

明 細 書

光デバイス及び光デバイスの製造方法、ならびに光集積デバイス

技 術 分 野

本発明は、高速マルチモード光伝送に用いられるシート状伝送路を備える光デバイス及び光デバイスの製造方法に関し、特定的には、光分岐器、光合成器、光分波器、光合波器、光ストレートシートバス、光クロスシートバス、スターカプラ、光スイッチ等に好適なマルチモード干渉のセルフイメージング原理を利用した光デバイス及び光デバイスの製造方法に関する。また、本発明は、上記光デバイスを複数備える光集積デバイスに関する。

背 景 技 術

光通信システム等に好適な、光伝送路を用いた光デバイスの研究が行われている。このような光デバイスは、光回路間のデータ交換のための光データバスシートへの応用や、信号光を分岐する光分岐器や信号光を合成するための光合成器への応用が期待されている。光伝送路のうち、マルチモードの光伝送路は、シングルモードの光伝送路と比較して安価であるため、旧来の電子回路の置き換えが可能である。

マルチモード光伝送路の内、シート状のマルチモード光伝送路がある。例えば、文献（３）は、屈折率が均質のシ

シート状の透明性媒体と、透明性媒体の入射端面に信号光を入射するレーザダイオードアレイと、透明性媒体の出射側端面から出射した信号光を受光するフォトダイオードアレイとを備える光バス回路基板を開示している。文献（３）に開示された光バス回路基板において、レーザダイオードアレイから放射された入射光は、透明性媒体の内部で厚さ方向と幅方向に全反射を繰り返して出射側端面の全面積から出射光として出射され、フォトダイオードアレイで受光される。

また、文献（２）は、文献（３）と同様に、屈折率が均質のシート状の透明性媒体と、透明性媒体に信号光を入射するレーザダイオードと、透明性媒体から出射した信号光を受光する複数の光ファイバとを備える光分岐装置を開示している。文献（２）に記載された光分岐装置は、入射側の端面に光拡散層を設けて短距離で効率よく信号光を透明性媒体の内部に拡散するようにしている。文献（２）においても入射光は、透明性媒体の内部で厚さ方向と幅方向に全反射を繰り返して出射側端面の全面積から出射光として出射され、フォトダイオードアレイで受光される。

また、文献（１）は、厚さ方向の中心に最大屈折率を有し、中心から離れるに従って屈折率を低下させる屈折率分布を持つシート状の光データバスを開示している。文献（１）に記載された光データバスは、屈折率分布によりマルチモードのモード分散を低減するとしている。文献（１）においても入射光は、出射側端面の全面積から出射光として出射される。

一方、入射側のシングルモード光伝送路と、出射側のシングルモード光伝送路との間に、幅方向にマルチモードで信号光を伝送する光導波路を配置する技術がある。この光導波路は、光導波路の一定の屈折率 n と、光導波路の幅方向の基本モード幅 W_0 と、伝送される信号光の波長 λ とから決定される所定の長さ方向の大きさ L を有する。光導波路は、この長さ方向の大きさ L に基づいて、信号光の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成する（文献（４）～（８）、（１１））。

また、近年、光通信の分野では、通信容量を拡大するために、複数の信号を異なる波長の信号光に乗せて多重化し、同一の光伝送路により伝送する波長分割多重伝送（Wave length Division Multiplexing：WDMともいう）方式が検討されている。WDM方式においては、異なる波長の信号光を分波する光分波器、及び異なる波長の信号光を合波する光合波器等の光デバイスが重要な役割を果たす。

このような光分波器及び光分岐器を、入射側のシングルモード光伝送路と、出射側のシングルモード光伝送路との間に、幅方向にマルチモードで信号光を伝送する光導波路を配置する技術を用いて実現した従来例が知られている（文献（９）、（１２）～（１５））。これら従来の光分波器及び光分岐器は、入射側シングルモード導波路と、入射側シングルモード導波路に接続され、幅方向にマルチモードで伝送する光導波路とを備える。文献（９）、（１２）～（１５）に記載された光デバイスは、入射側シングルモ

ード導波路に互いに異なる2波長の多重信号光を伝送して、光導波路に入射させる。光導波路は、信号光の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することによって、出射端上の相異なる位置出射光に生成するように、光導波路の幅方向の大きさと長さ方向の大きさを設定している。

また、文献（10）は、入射側ビーム変換部と、光導波路部と、出射側ビーム変換部とを備える光デバイスの製造方法を開示している。文献（10）の光デバイスの製造方法は、流動性のある材料をガラス基板内に封止して光導波路を形成することを述べている。また、文献（10）は、特に入射側ビーム変換部及び出射側ビーム変換部を、屈折率の異なる素材を順に積層していくことにより屈折率分布を施すことを開示している（文献（10）、第4図及び対応する記載参照）。

マルチモードの光伝送路を均質な媒質で構成した場合、信号光を伝送すると、モード毎に物理的な光路長（位相速度）が異なってしまう。このため、光伝送路の長さに依存して出射される光の強度分布が変化する現象が発生する。

また、マルチモードの光伝送路の長さが100mmを超える程度に長くなる場合は、光路ごとに群速度が相違するため、伝送される光の信号波形が変化してしまう現象が発生する。

このように、モード間で位相速度や群速度が異なる減少であるモード分散が発生すると、入射光の強度分布を出射側へ保持したまま伝送することができない。

上記のような問題を解決するために、屈折率分布が施さ

れた光伝送路が提案されている。屈折率分布を持つ媒質中を伝搬する信号光は、屈折率分布に基づき曲線状（蛇行線形状）の光線軌跡を描く。この現象を応用すると、各光路間で物理的な光路長が相違しても、屈折率の差によって光学的な光路長を等しくできる。したがって、屈折率分布を適切に設定することより、モード分散を抑制するのでマルチモードの光伝送路を得ることができる。

例えば、文献（１）は、積層されたシート状光伝送路を備え、それぞれのシート状光伝送路が積層される方向に屈折率分布を有する光デバイスを記載している。文献（１）に記載されたシート状光伝送路は、屈折率分布によってモード分散が抑制されるので、マルチモードでギガビットクラスの高周波信号を伝送することができる。

このような光デバイスでは、シート状光伝送路に信号光を入射し、シート状光伝送路から信号光を出射するための構成が必要となる。上述の文献（１）に記載された光デバイスにおいて、信号光は、シート状光伝送路の一方の端部から信号光の伝送方向に平行に入射され、シート状光伝送路の他方の端部から信号光の伝送方向に平行に出射する（文献（１）の図１、図９）。

また、光導波路（シート状光伝送路）に信号光の光軸を垂直に折り曲げるためのミラーを設け、外部と光導波路とを結合する技術が知られている（文献（１６）２の第１図、第２図）。文献（１６）に記載された光導波路において、伝送方向に対して垂直な方向から入射する信号光は、信号光の伝送方向に対して４５度の角度をなすミラーによっ

て折り曲げられ光導波路に入射する。また、光導波路を伝送した信号光は、信号光の伝送方向に対して45度の角度をなすミラーによって折り曲げられ、伝送方向に対して垂直な方向へ出射する（文献（16）の第1図、第2図参照）。

文献のリスト

- (1) 特開2000-111738号公報（第3図）
- (2) 特開2000-329962号公報（第2図）
- (3) 特開2001-147351号公報（第1図）
- (4) 特開2003-050330号公報（第1図）
- (5) 特開2001-183710号公報（第1図）
- (6) 特開平1-156703号公報（第1図）
- (7) 米国特許第4,087,159号明細書（第1図）
- (8) 米国特許第4,950,045号明細書（第1図）
- (9) 特開平8-201648号公報（第2-5頁、第11図）
- (10) 特開2003-043285（第4図）
- (11) Lucas B. Soldano and Eric C. M. Pennings, "Optical Multi-Mode Interference Device Based on Self-Imaging: Principles and Applications", Vol.13, No.4 Journal of Lightwave Technology, April, 1995
- (12) F. Rottmann, A. Neyer, W. Mevenkamp, and E. Voges, "Integrated-Optic Wavelength Multiplexers on Lithium Niobate based on Two-Mode Interference", Journal of Lightwave Technology" Vol.6, No.6 June, 1988

(1 3) M. R. Paiam, C. F. Janz, R. I. MacDonald and J. N. Broughton, "Compact Planar 980/1550-nm Wavelength Multi/Demultiplexer Based on Multimode Interference" IEEE Photonics Technology Letters, Vol.7, No.10, October, 1995

(1 4) K. C. Lin and W. Y. Lee, "Guided-wave 1.3/1.55 μ m wavelength division multiplexer based on multimode inteference", IEEE Electronics Letters, Vol.32, No.14, July 4, 1996

(1 5) Baojun Li, Guozheng Li, Enke Liu, Zuimin Jiang, Jie Qin and Xun Wang, "Low-Loss 1×2 Multimode Interference Wavelength Demultiplexer in Silicon-Germanium Alloy" IEEE Photonics Technology Letters, Vol.11, No.5 May, 1999

(1 6) 特開昭 6 2 - 3 5 3 0 4 号公報 (第 1 図、第 2 図)

発明の開示

文献 (2) 及び (3) に記載されたマルチモード光伝送路は、信号光として入射した入射光を透明性媒体の内部を厚さ方向及び幅方向に全反射しながら伝送する。このため、拡散して入射した入射光の経路間で光路長差が発生し、モード分散が生じていた。したがって、文献 (2) 及び (3) に記載されたマルチモード光伝送路は、一般的な入射光の拡散により伝送速度が制限され、10 Gbps を超えるような高速伝送をすることができなかった。

文献（１）に記載された光データバスは、厚さ方向において屈折率分布を有するため厚さ方向のモード分散は抑制される。しかしながら、幅方向において一定屈折率であるため、幅方向のモード分散が発生し、同様に伝送速度が制限されるという問題があった。また、文献（１）～（３）に記載された技術は、いずれも出射側端面の全面積から出射光として出射されるので、出射側に設けられた光伝送路との結合損失が大きいという問題があった。

また、文献（４）～（８）、（１１）に記載された光導波路は、厚さ方向においてシングルモードである信号光を入射する場合は結合損失も小さく、高速に伝送することができる。しかしながら、シングルモードであっても信号光として拡散が大きく広がり角度が大きい入射光や、マルチモード導波路からの出射光のようにビーム径の大きな入射光を用いる場合は、光導波路への結合が困難であるため入出射する際の信号光の損失が大きいという問題があった。また、文献（４）～（８）、（１１）に記載された光導波路は、光導波路の中心に対して軸ズレして入射する入射光に対して損失が大きいので、入出射光を入出射側と高い精度で結合する必要があった。

また、文献（４）～（８）、（１１）に記載された光導波路を、厚さ方向においてマルチモードである信号光を入射させて用いる場合、拡散が大きく広がり角度が大きい入射光やビーム径の大きな入射光に対する入出射光の結合が困難であるという問題は改善される。しかしながら、文献（４）～（８）、（１１）に記載された光導波路を、厚さ

方向においてマルチモードの信号光を入射させて用いると、厚さ方向にモード分散が発生し、高速に伝送することができない。また、この場合において、厚さ方向に軸ズレ入射する入射光は、厚さ方向に励振される複数の固有モードが長さ方向に沿って干渉するため、出射光の厚さ方向の強度分布が変化するという問題もあった。厚さ方向の強度分布が変化すると、出射光を出射側の光伝送路へ結合する際の損失が大きい。

一方、文献（１０）に記載された光デバイスの製造方法は、光導波路が屈折率分布を持たせた例ではなく、入射側あるいは出射側ビーム変換部に屈折率分布を持たせた例を開示している。したがって、文献（１０）に記載された光デバイスの製造方法の内、光導波路を製造する工程を用いた場合、文献（１）、（２）、（４）～（９）、（１１）～（１５）に記載された従来の均質な屈折率を持つ光伝送路を製造することしかできない。また、文献（１０）に記載された光デバイスの製造方法の内、ビーム変換部を製造する工程を用いた場合、レンズ機能を持たせるように幅方向の大きさと長さ方向の大きさを規定しているので、マルチモード干渉を発生させる光導波路を得ることはできない。また、文献（１０）に記載された光デバイスの製造方法のビーム変換部を製造する工程は、屈折率の異なる素材を順に積層する方法であるため、光導波路に屈折率分布を形成する方法に適用すると生産性が高い方法とはいえない。

そこで、本発明の第１の目的は、信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝

送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10Gbps程度の高速伝送が可能である光デバイス及びその光デバイスの製造方法を提供することである。また、本発明の第1の目的は、上記光デバイスを複数備える光集積デバイス及び光集積デバイスの製造方法を提供することである。

上記第1の目的は、以下の第1の光デバイスにより達成される。

外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

入力信号に対応する信号光を、光伝送路へ入射光として入射させ、

光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

光伝送路から出射光を出射させ、出射光に対応する出力信号を出力することを特徴とする。

本発明に係る第1の光デバイスは、光伝送路が厚さ方向に屈折率分布を備えているので、マルチモードで信号光を伝送する構成であっても厚さ方向にモード分散が抑制され

、高速に信号光を伝送することができる。また、本発明に係る光デバイスは、光伝送路がマルチモード干渉により出射光を発生させるので、入出射の際の損失が小さく接続の際に高精度の調整が不要である。

好ましくは、光伝送路は、光伝送路の幅方向に励振する第0次モードの伝搬定数と、第1次モードの伝搬定数との間の差の関数で表される長さ方向の大きさを持つ。好ましくは、光伝送路は、幅方向の基本モード幅と、幅方向に励起した0次モード光に対する実効屈折率と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長との関数で表される長さ方向の大きさを持つ。

好ましくは、光伝送路は、厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。特に、屈折率分布は、ほぼ2次関数に沿って変化することが望ましい。

好ましくはさらに、光伝送路は、ポリシランからなることが望ましい。特に、光伝送路は、ポリシランからなり、当該ポリシランが硬化する際の酸素濃度分布によって屈折率分布が施される。

好ましくは、入力信号は、電気信号であり、当該電気信号を信号光へ変換し、信号光を光伝送路へ入射光として入射させる入射部を備える。一例として、入射部は、光伝送路の幅方向にアレイ状に並ぶ複数の発光部を有する。また、好ましくは、入力信号は、信号光であり、当該信号光を光伝送路へ入射光として入射させる入射部を備える。

好ましくは、出力信号は、電気信号であり、光伝送路か

ら出射された出射光として信号光を受光し、当該信号光を電気信号へ変換する出射部を備える。一例として、出射部は、光伝送路の幅方向にアレイ状に並ぶ複数の受光部を有する。また、好ましくは、出力信号は、信号光であり、当該信号光を光伝送路から出射光として出射させる出射部を備える。

好ましくは、光デバイスは、少なくとも1個の入力信号を入力し、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の出力信号として出力可能である光 N 分岐デバイスであり、

光伝送路は、

入射光を入射させるための入射面と、

出射光を出射させるための出射面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した0次モード光に対する実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

入射面上であって幅方向の中心に1個の入射光を入射させ、出射面上であって幅方向の中心に対称に N 個の出射光を生成する。

$$\frac{1}{N} \cdot \frac{n_0 W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の入力信号を入力し、少なくとも1個の出力信号として出力可能である光 N 合成デバイスであり、

光伝送路は、

入射光を入射させるための入射面と、

出射光を出射させるための出射面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光に対する実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

入射面上であって幅方向の中心に对称にすべて同一の波長 λ を有する N 個の入射光を入射させ、出射面上であって幅方向の中心に 1 個の出射光を生成する。

$$\frac{1}{N} \cdot \frac{n_0 W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の入力信号を入力し、当該入力信号に 1 対 1 対応する N 個の出力信号として出力可能であるストレートシートバスであり、

光伝送路は、

入射光を入射させるための入射面と、

出射光を出射させるための出射面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

入射面上であって幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の入射光を入射させ、出射面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が同一である位置にそれぞれ、 N 個の入射光に 1 対 1 対応する N 個の出射光を生成する。

$$\frac{8n_0W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の入力信号を入力し、当該入力信号に 1 対 1 対応する N 個の出力信号として出力可能であるクロスシートバスであり、

光伝送路は、

入射光を入射させるための入射面と、

出射光を出射させるための出射面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の奇数倍になる値であり、

入射面上であって幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の入射光を入射させ、出射面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、 N 個の入射光と 1 対 1 対応する N 個の出射光を生成する。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の入力信号を入力し、当該入力信号にそれぞれ対応する N 個の出力信号として出力するスターカプラであり、

光伝送路は、

入射光を入射させるための入射面と、

出射光を出射させるための出射面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の値であり、

入射面上であって幅方向の所定の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の入射光を入射させ、出射面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、入射光のいずれの 1 個に対しても N 個の出射光を生成する。

$$\left(p \pm \frac{1}{N}\right) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (p \text{ はかつこ内を正の値にする整数})$$

好ましくはさらに、光デバイスは、 N_{EVEN} ($N_{\text{EVEN}} = 2, 4, 6 \dots$) 個の入力信号を入力し、当該入力信号にそれぞれ対応する N_{EVEN} 個の出力信号として出力するスターカップラであり、

光伝送路は、入射面上であって幅方向の中心に対称な位置にすべて同一の波長 λ を有する N_{EVEN} 個の入射光を入射させる。

また、好ましくはさらに、光デバイスは、 N_{ODD} ($N_{\text{ODD}} = 1, 3, 5 \dots$) 個の入力信号を入力し、当該入力信号にそれぞれ対応する N_{ODD} 個の出力信号として出力するスターカップラであり、

光伝送路は、入射面上であって幅方向の中心に非対称な位置にすべて同一の波長 λ を有する N_{ODD} 個の入射光を入射させる。

好ましくは、光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$)

個の入力信号を入力し、当該第1の入力信号に1対1対応するN個の出力信号として出力可能であり、M（M = 1，2，3・・・）個の入力信号を入力し、当該入力信号に1対1対応するM個の出力信号として出力可能である双方向ストレートシートバスであり、

光伝送路は、

長さ方向の一方の端部に形成された第1面と、

長さ方向の他方の端部に形成された第2面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した0次モード光の実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

第1面上であって幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有するN個の入射光を入射させ、第2面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が同一である位置にそれぞれ、N個の入射光と1対1対応するN個の出射光を生成し、

第2面上であって幅方向の任意の位置に第1面に入射する入射光とすべて同一の波長 λ を有するM個の入射光を入射させ、第1面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が同一である位置にそれぞれ、M個の入射光と1対1対応するM個の出射光を生成する。

$$\frac{8n_0W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光デバイスは、N（N = 1，2，3・・・）個の第1の入力信号を入力し、当該第1の入力信号に1

対 1 対応する N 個の第 1 の出力信号として出力可能であり、M (M = 1, 2, 3 · · ·) 個の第 2 の入力信号を入力し、当該第 2 の入力信号に 1 対 1 対応する M 個の出力信号として出力可能である双方向クロスシートバスであり、

光伝送路は、

長さ方向の一方の端部に形成された第 1 面と、

長さ方向の他方の端部に形成された第 2 面とを含み、

長さ方向の大きさが、幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の奇数倍になる値であり、

第 1 面上であって幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の入射光を入射させ、第 2 面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、N 個の入射光と 1 対 1 対応する N 個の出射光を生成し、

第 2 面上であって幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する M 個の入射光を入射させ、第 1 面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、M 個の入射光と 1 対 1 対応する M 個の出射光を生成する。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光伝送路は、長さ方向の一方の端部に形成され厚さ方向に平行な方向に沿って入射する入射光の光路を長さ方向へほぼ 90° 折り曲げる反射面、及び／又は長

さ方向の他方の端部に形成され長さ方向に沿って伝送された出射光の光路を厚さ方向に平行な方向に沿って出射させるようにほぼ90°折り曲げる反射面を含む。

好ましくは、光伝送路は、長さ方向の一方の端部に形成され厚さ方向に傾斜した方向に沿って入射する入射光の光路を長さ方向へ折り曲げるプリズム、及び／又は長さ方向の他方の端部に形成され長さ方向に沿って伝送された出射光の光路を厚さ方向に傾斜した方向に沿って出射させるように折り曲げるプリズムを含む。

好ましくは、光伝送路は、厚さ方向に複数の固有モードを有する。この構成により、厚さ方向にも、マルチモード干渉を利用した光デバイスを提供することができる。好ましくは、光伝送路は、20 μ m以上の厚さを有する。

好ましくは、光伝送路は、長さ方向及び厚さ方向を含む任意の相異なる2個の断面において、厚さ方向の中心位置が、常に同一の曲線を描くように湾曲している。好ましくは、光伝送路は、長さ方向及び厚さ方向を含む任意の相異なる2個の断面において、厚さ方向の中心位置が、異なる曲線を描くように振れている。

上記第1の目的は、以下の光集積デバイスにより達成される。

外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光集積デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路

を厚さ方向に複数積層してなる光伝送部を備え、

入力信号に対応する信号光を、各光伝送路へ入射光として入射させ、

各光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

各光伝送路から出射光を出射させ、出射光に対応する出力信号を出力することを特徴とする。

本発明に係る光集積デバイスは、各光伝送路が厚さ方向に屈折率分布を備えているので、マルチモードで信号光を伝送する構成であっても厚さ方向にモード分散が抑制され、高速に信号光を伝送することができる。また、本発明に係る光集積デバイスは、各光伝送路がマルチモード干渉により出射光を発生させるので、入出射の際の損失が小さく接続の際に高精度の調整が不要である。

上記第1の目的は、以下の光デバイスの第1の製造方法により達成される。

外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスの製造方法であって、

光デバイスは、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送

路を備え、

入力信号に対応する信号光を、光伝送路へ入射光として入射させ、

光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

光伝送路から出射光を出射させ、出射光に対応する出力信号を出力し、

光デバイスの製造方法において、

光伝送路の材料である樹脂を硬化させるために印加されるべきエネルギーが伝達可能な材料からなり、少なくとも光伝送路の厚さ方向と同一の深さを持つ凹部を含む成形型を準備する第1の工程と、

凹部に、樹脂を充填する第2の工程と、

樹脂が充填された成形型に対して、厚さ方向の上下から所定量のエネルギーを印加する第3の工程と、

所望の屈折率分布が形成されて硬化した樹脂に対して、光伝送路にするために、少なくとも長さ方向の大きさを決定して、入射光の出射光の接続部分を形成する第4の工程とを備える。

本発明の光デバイスの第1の製造方法は、以上の工程を備えているので、所望の屈折率分布を含むシート状の光伝送路を容易に高精度に製造することができる。

好ましくは、

第 3 の工程において、

エネルギーの印加は、所定波長の紫外線の照射であり

第 1 の工程において、

準備される成形型は、所定波長の紫外線に対して透明な材料からなる。

好ましくは、

第 3 の工程において、

エネルギーの印加は、加熱である。

好ましくは、光伝送路は、厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。好ましくはさらに、屈折率分布は、ほぼ 2 次関数に沿って変化する。

好ましくはさらに、光伝送路は、ポリシランからなる。また、好ましくはさらに、光伝送路は、ポリシランからなり、当該ポリシランが硬化する際の酸素濃度分布によって屈折率分布が施される、請求項 35 に記載の光デバイスの製造方法。

好ましくは、

第 1 の工程において、

成形型は、製造すべき光伝送路が複数個含まれる大きさを有する凹部を含み、

第 4 の工程において、

樹脂を切断することにより、複数個の光伝送路を同時に製造する。

好ましくは、

第 1 の工程において、

成形型は、製造すべき光伝送路の幅方向にほぼ等しい大きさを有する凹部を含み、

第 4 の工程において、

樹脂を切断することにより、長さ方向の大きさを決定する。

好ましくは、

第 1 の工程において、

成形型は、製造すべき光伝送路にほぼ等しい大きさを有する凹部を含み、

第 4 の工程において、

光伝送路へ入射光及び出射光を入出射させるべき位置の凹部の壁面を除去する。

好ましくは、

さらに、第 4 の工程の前後のいずれか一方に、

成形型から光伝送路を離型する第 5 の工程を含む。

本発明の光デバイスの製造方法は、第 5 の工程を含むことにより、成形型の再利用がはかれるため製造時のコストダウンを行うことができる。

上記第 2 の目的は、以下の第 2 の光デバイスにより達成される。

互いに異なる 2 個の波長が重ね合わされた多重信号光を入力し、当該多重信号光を波長に応じて分波して、2 個の互いに異なる信号光として出力可能である光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部

分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

多重信号光を、光伝送路へ入射光として入射させ、

光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に各波長ごとに複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、同一の波長の信号光について複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより、波長に応じて幅方向の異なる位置に２個の出射光を生成し、

光伝送路から２個の出射光を出射させることを特徴とする。

本発明に係る第２の光デバイスは、光伝送路が厚さ方向に屈折率分布を備えているので、マルチモードで信号光を伝送する構成であっても厚さ方向にモード分散が抑制され、高速に信号光を伝送することができる。また、本発明に係る光デバイスは、光伝送路がマルチモード干渉により出射光を発生させ波長に応じて分波させるので、入出射の際の損失が小さく接続の際に高精度の調整が不要である。

好ましくは、２個の出射光は、互いの光量の比が、最大になる幅方向の位置からそれぞれ出射される。好ましくは、２個の出射光は、互いの光量が最小になる幅方向の位置からそれぞれ出射される。

好ましくは、光伝送路は、光伝送路の幅方向に励振する第０次モードの伝搬定数と、第１次モードの伝搬定数との

間の差の関数で表される長さ方向の大きさを持つ。

好ましくは、光伝送路は、直方体形状であり、幅方向の基本モード幅と、厚さ方向の最大屈折率と、マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長との関数で表される長さ方向の大きさを持つ。

好ましくは、光伝送路は、厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。特に、屈折率分布は、ほぼ2次関数に沿って変化することが望ましい。

文献（9）及び（12）～（15）に記載された光デバイスは、光分岐を行う光導波路が幅方向にのみマルチモードで信号光を伝送するため、前述の文献（4）～（8）及び（11）と同様の課題を有していた。すなわち、シングルモードであっても信号光として拡散が大きく広がり角度が大きい多重信号光やビーム径の大きな多重信号光を用いる場合は、光導波路への結合が困難であるため入出射する際の信号光の損失が大きいという問題があった。また、光導波路の中心に対して軸ズレして入射する入射光に対して損失が大きいので、入射する多重信号光や出射する信号光を入出射側と高い精度で結合する必要があった。

また、文献（9）及び（12）～（15）に記載された光デバイスに記載された光導波路を、厚さ方向においてマルチモードの多重信号光を入射させて用いると、厚さ方向にモード分散が発生し、高速に伝送することができない。また、この場合において、厚さ方向に軸ズレ入射する多重信号光は、厚さ方向に励振される複数の固有モード長さ方

向に沿って干渉するため、厚さ方向の強度分布が変化するという問題もあった。厚さ方向の強度分布が変化すると、多重信号光を分波したり合波したりすることができない。

そこで、本発明の第2の目的は、信号光を入射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10Gbps程度の高速伝送が可能で、多重信号光の分波及び合波を良好に行うことができる光デバイスを提供することである。

上記第2の目的は、以下の第3の光デバイスにより達成される。

互いに異なる波長を持つ2個の信号光を入力し、当該信号光を合波して、互いに異なる2個の波長が重ね合わされた多重信号光として出力可能である光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

2個の信号光を、光伝送路へ入射光として入射させ、

光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に各波長ごとに複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、同一の波長の信号光について複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより、波長に応じて幅方向の同一位置に多重信号光である出射光を生成し、

光伝送路から出射光を出射させることを特徴とする。

本発明に係る第3の光デバイスは、光伝送路が厚さ方向に屈折率分布を備えているので、マルチモードで信号光を伝送する構成であっても厚さ方向にモード分散が抑制され、高速に信号光を伝送することができる。また、本発明に係る光デバイスは、光伝送路がマルチモード干渉により出射光を発生させ波長に応じて合波させるので、入出射の際の損失が小さく接続の際に高精度の調整が不要である。

文献(1)～(8)及び(11)に記載の光伝送路あるいは光導波路は、いずれも入射光に対応して一義的に出射光を出射させるにとどまっている。したがって、光伝送路あるいは光導波路を用いて、入射光に対応した出射光の出射位置を選択するスイッチングを行う技術思想は示唆されていない。

そこで、本発明の第3の目的は、信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10Gbps程度の高速伝送が可能で、伝送される信号光のスイッチングが可能な光デバイスを提供することである。

上記第3の目的は、以下の第4の光デバイスにより達成される。

外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含み、厚さ方

向に直交する幅方向に隣接する第 1 の部分光伝送路及び第 2 の部分光伝送路からなる光伝送路と、

外部から供給される制御信号に基づいて、第 1 及び第 2 の部分光伝送路の内、少なくとも一方の屈折率分布を変更可能である屈折率変調手段とを備え、

屈折率変調手段の動作に基づいて、第 1 の部分光伝送路のみを用いて入射光を伝送する第 1 の状態と、第 1 及び第 2 の部分光伝送路を用いて入射光を伝送する第 2 の状態との間を選択可能であり、

入力信号に対応する信号光を、第 1 の光伝送路へ入射光として入射させ、

第 1 の状態である場合、

第 1 の光伝送路の内部において、厚さ方向及び幅方向に直交する長さ方向に沿って、幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

第 1 の光伝送路から出射光を出射させ、出射光に対応する出力信号を出力する一方、

第 2 の状態である場合、

第 1 及び第 2 の光伝送路の内部において、厚さ方向に沿って、幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

第 2 の光伝送路から出射光を出射させ、出射光に対応する出力信号を出力することを特徴とする。

本発明に係る第４の光デバイスは、光伝送路が厚さ方向に屈折率分布を備えているので、マルチモードで信号光を伝送する構成であっても厚さ方向にモード分散が抑制され、高速に信号光を伝送することができる。また、本発明に係る光デバイスは、光伝送路がマルチモード干渉により出射光を発生させスイッチングさせるので、入出射の際の損失が小さく接続の際に高精度の調整が不要である。

好ましくは、屈折率変調手段は、

第１のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を変更可能であり、

第２の状態において、第１及び第２のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を等しくし、

第１の状態において、第１のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、第２のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より大きくする。

好ましくは、屈折率変調手段は、

第２のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を変更可能であり、

第２の状態において、第１及び第２のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を等しくし、

第１の状態において、第２のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、第１のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より小さくする、請求項４９に記載の光デバイス。

好ましくは、屈折率変調手段は、

第１及び第２のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布

を変更可能であり、

第 2 の状態において、第 1 及び第 2 のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を等しくし、

第 1 の状態において、第 1 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、第 2 の状態における第 2 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より大きくするとともに、第 2 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、第 2 の状態における第 1 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より小さくする。

好ましくは、第 1 及び第 2 のマルチモード部分光伝送路の内、屈折率変調手段によって、屈折率分布が変更可能である光伝送路は、熱光学効果を呈するポリマーからなり、

屈折率変調手段は、制御信号に応じて熱の発生／吸収が可能な冷熱シートを含み、

冷熱シートによって光伝送路の温度を変化させて屈折率分布を変化させる。

好ましくは、光伝送路は、

長さ方向の大きさが、伝送路の幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、第 1 及び第 2 の光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の奇数倍になる値である。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

好ましくは、光伝送路は、

光伝送路を加えた幅方向に対して $(1/\sqrt{2})$ 倍にな

る幅方向の大きさを持つ。この構成により、第2の状態においてもマルチモード干渉により出射光を発生させることができる。

好ましくは、光伝送路は、厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。特に、各屈折率分布は、ほぼ2次関数に沿って変化することがのぞましい。

文献(4)～(8)及び(11)に記載された光導波路は、入力側及び出射側とも光導波路が、共にシングルモード(コア径は大きくても $10\mu\text{m}$)である。したがって、幅方向に異なる固有モード同士を干渉(Multi-Mode Interference: 以下、MMIということがある))させ、セルフイメージング原理に基づいて出射光を発生させた場合、出力端の出射光の分離間隔は、2分岐の場合で出力側における光導波路のコア径に相当する $10\mu\text{m}$ 程度でよい。しかし、入力側および出力側を共にマルチモード光導波路にした場合、同様に計算したコア径は $20\mu\text{m}\sim 1,000\mu\text{m}$ 程度と大きくなる。このため、光導波路の出力端の出射光の分離間隔も最低でもコア径以上が必要になる。

マルチモード干渉のセルフイメージング原理による出射光の分離間隔は、光導波路の幅にほぼ比例する。また、この場合における光導波路の長さ方向の大きさは、幅方向の大きさの2乗にほぼ比例する。このため、入力側および出力側を共にマルチモード光導波路にした場合、光導波路

の形状は、シングモード光導波路の場合と比較して、幅方向で2～100倍、長さ方向で4～10,000倍となり巨大になってしまう。例えば、200 μ mのマルチモード光ファイバを入出力導波路として使用した場合、シングルモード光ファイバを使用した場合と比較して、幅方向の大きさが20倍で、長さ方向の大きさが約200倍（具体的には、幅：約400 μ m、長さ：約120,000 μ m）となり、巨大であると同時に幅と長さのバランス（比率）が悪く取扱いが困難である。

さらに、マルチモード干渉のセルフイメージング原理より発生する出射光のプロファイルは、入射光のプロファイルとほぼ同じである。このため、2分岐以上の合成あるいは分岐を行う場合、すなわち、入出射端により多くのモードフィールドの大きな入出射光を入出力する場合、光導波路の幅方向の大きさをより大きくしなければならない。既に説明したように、マルチモード干渉のセルフイメージング原理によって出射光を発生させる光導波路の長さ方向の大きさは、幅方向の大きさの2乗にほぼ比例する。したがって、光導波路の幅方向の大きさが大きくなると、長さ方向の大きさは2分岐の場合以上の大きさが必要になるという問題があった。

そこで、本発明の第4の目的は、信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10Gbps程度の高速伝送が可能で、シート状マルチモード光伝送路の幅方向と長さ方向の大きさがコンパクトな光

デバイスを提供することである。また、本発明の第4の目的は、上記光デバイスの製造方法を提供することである。

上記第4の目的は、以下の第5の光デバイスにより達成される。

直線上に並べられた N ($N = 2, 3, 4 \dots$) 個の信号光の間隔を変化させるための光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を、直線に沿って N 個配置し、

各信号光を、各光伝送路へ入射光として入射させ、

各光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより、幅方向において入射光が各光伝送路へ入射した位置とは異なる位置に出射光を生成し、

各光伝送路から信号光として出射光を出射させる。

本発明に係る第5の光デバイスは、以上の構成を備えているので、複数の信号光の間隔を容易に変更することができる。したがって、入出射部にマルチモードの光ファイバ等を用いた場合でも光伝送路を大型させることなく、接続が可能である。

好ましくは、各光伝送路は、

入射光を入射させるための入射面と、

出射光を出射させるための出射面とを含み、

入射面上であって幅方向の任意の位置に入射光を入射させ、出射面上であって各入射光の入射位置と幅方向の位置が幅方向の中心に対して対称になる位置に出射光を生成する。

好ましくは、光デバイスは、信号光の間隔を拡大する。好ましくは、シート状の入射側光伝送路を備え、当該光伝送路は、1個の入射光をN個に分岐する光N分岐デバイスであり、N分岐された出射光を信号光として各光伝送路に接続する。

上記第4の目的は、以下の第6の光デバイスにより達成される。

信号光の位置を変化させるための光デバイスであって、シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を複数備え、

光伝送路から出射される出射光が、他の光伝送路へ入射すべき入射光になるよう複数の光伝送路を多段接続し、

信号光を、光伝送路へ入射光として入射させ、

各光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより、幅方向において入射光が各光伝送路へ入射した位置とは異なる位置に出射光を生成し、

各光伝送路から信号光として出射光を出射させる。

本発明に係る第6の光デバイスは、以上の構成を備えているので、信号光を容易に幅方向にシフトすることができる。したがって、入出射部にマルチモードの光ファイバ等を用いた場合でも光伝送路を大型させることなく、接続が可能である。

好ましくは、信号光は、直線上に並べられた N ($N = 2, 3, 4 \dots$) 個の信号光であり、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を、 N 個の信号光同士の間隔を変化させるために直線に沿って N 個配置し、

各信号光を、各光伝送路へ入射光として入射させ、

各光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより、幅方向において入射光が各光伝送路へ入射した位置とは異なる位置に出射光を生成し、

各光伝送路から信号光として出射光を出射させる。

上記第4の目的は、以下の第7の光デバイスにより達成される。

外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスであって、

シート状であり、シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに

従って屈折率が増加しない屈折率分布を含むシート状光伝送路と、

入力信号に応じた入射光を、シート状光伝送路へ入射させるために伝送する入射側光伝送路と、

入射側光伝送路とシート状光伝送路とを接続し、入射側光伝送路のモードフィールドを、シート状光伝送路へ入射できるように変換する入射側ビーム変換部と、

シート状光伝送路から出射光を、出力信号として出射させるために伝送する出射側光伝送路と、

出射側光伝送路とシート状光伝送路とを接続し、シート状光伝送路のモードフィールドを、出射側光伝送路へ入射できるように変換する出射側ビーム変換部とを備え、

入射側ビーム変換部から出射する信号光を、シート状光伝送路へ入射光として入射させ、

シート状光伝送路の内部において、厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、長さ方向及び厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで入射光を伝送するとともに、複数の固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

シート状光伝送路から出射光を出射させ、出射側ビーム変換部へ入射させる。

本発明に係る第7の光デバイスは、以上の構成を備えているので、複数の信号光の間隔を容易に変更することができる。したがって、入出射部にモードフィールドの異なるマルチモードの光ファイバ等を用いた場合でも光伝送路を大型させることなく、接続が可能である。

好ましくは、入射側ビーム変換部は、

中心を最大屈折率として中心から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有するレンズ素子であり、

シート状光伝送路に入射される信号光と同数配置される。

好ましくは、入射側ビーム変換部は、

入射側光伝送路側からシート状光伝送路側へ向けて、中心と周辺との間の屈折率の変化が次第に大きくなる屈折率分布を含む。

好ましくは、入射側ビーム変換部は、

シート状光伝送路の厚さ方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する導波路であり、

シート状光伝送路に入射される信号光と同数配置される。

好ましくは、導波路は、幅方向の大きさがシート状光伝送路との接続部に向けて小さくなる形状を備える。好ましくはさらに、入射側ビーム変換部は、シート状光伝送路と一体的に形成される。

好ましくは、入射側ビーム変換部は、

シート状光伝送路の厚さ方向に平行な方向及び幅方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する光伝送路であり、

シート状光伝送路に対して1個配置される。

好ましくは、出射側ビーム変換部は、

中心を最大屈折率として中心から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有するレンズ素子であり、

シート状光伝送路から出射される信号光と同数配置される。

好ましくは、出射側光伝送路は、

中心を最大屈折率として中心から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する光ファイバであり、

出射側ビーム変換部は、

出射側光伝送路側からシート状光伝送路側へ向けて、中心と周辺との間の屈折率の変化が次第に大きくなる屈折率分布を含む。

好ましくは、出射側ビーム変換部は、

シート状光伝送路の厚さ方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する導波路であり、

シート状光伝送路から出射される信号光と同数配置される。

好ましくはさらに、導波路は、幅方向の大きさがシート状光伝送路との接続部に向けて小さくなる形状を備える。好ましくはさらに、出射側ビーム変換部は、シート状光伝送路と一体的に形成される。

好ましくは、出射側ビーム変換部は、

シート状光伝送路の厚さ方向に平行な方向及び幅方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する光伝送路であり、

シート状光伝送路に対して 1 個配置される。

上記第 4 の目的は、以下の光デバイスの第 2 の製造方法により達成される。

外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスの製造方法であって、

光デバイスは、

シート状であり、シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含むシート状光伝送路と、

入力信号に応じた入射光を、シート状光伝送路へ入射させるために伝送する入射側光伝送路と、

入射側光伝送路とシート状光伝送路とを接続し、入射側光伝送路のモードフィールドを、シート状光伝送路へ入射できるように変換する入射側ビーム変換部と、

出射光を、シート状光伝送路から出力信号として出射させるために伝送する出射側光伝送路と、

出射側光伝送路とシート状光伝送路とを接続し、シート状光伝送路のモードフィールドを、出射側光伝送路へ入射できるように変換する出射側ビーム変換部とを備え、

シート状光伝送路と、入射側ビーム変換部及び出射側ビーム変換部の内の少なくとも一方とに対応する凹部を有し、シート状光伝送路の材料である樹脂を硬化させるために印加されるべきエネルギーが伝達可能な材料からなる成形型を準備する第 1 の工程と、

凹部に、樹脂を充填する第２の工程と、

樹脂が充填された成形型に、樹脂を硬化させて所望の屈折率分布を形成するために、厚さ方向の上下から所定量のエネルギーを印加する第３の工程と、

硬化した樹脂に、凹部に形成されていない入射側ビーム変換部及び出射側ビーム変換部がある場合には当該変換部を接続し、さらに、入射側光伝送路と、出射側光伝送路とを接続する第４の工程とを備える。

本発明に係る光デバイスの第２の製造方法は、以上の工程を備えるので、所望の屈折率分布を含むシート状の光伝送路と入射側光伝送路と、出射側光伝送路とを備える光デバイスを容易に高精度に製造することができる。

好ましくは、エネルギーの印加は、所定波長の紫外線の照射であり、

成形型は、所定波長の紫外線に対して透明な材料からなる。

また、好ましくは、エネルギーの印加は、加熱である。

好ましくは、第４工程に先立って、硬化した樹脂を成形型から離型する第５の工程を備える。

好ましくは、第４工程において、

硬化した樹脂に、成形型に形成されていない入射側ビーム変換部及び出射側ビーム変換部がある場合には当該変換部を接続し、さらに、入射側光伝送路と、出射側光伝送路とを接続する際に、当該光伝送路を位置決めするための位置決め部が形成された基板に各光伝送路を配置する。

好ましくは、第１の工程において、

成形型は、入射側光伝送路及び出射側光伝送路の少なくとも一方を位置決めするための位置決め部を含み、

第4の工程において、

位置決め部が形成された成形型に各伝送路を配置する。

好ましくは、入射側光伝送路は、光ファイバである。また、好ましくは、出射側光伝送路は、光ファイバである。

本発明に係る第1の光デバイスによれば、信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10Gbps程度の高速伝送が可能である光デバイスを提供することができる。また、本発明に係る第1の光デバイスの製造方法によれば、上記光デバイスを製造することができる。

また、本発明に係る第1の光集積デバイスによれば、上記光デバイスを複数備える光集積デバイスを提供することができる。また、本発明に係る第1の光集積デバイスの製造方法によれば、上記光集積デバイスを製造することができる。

本発明に係る第2及び第3の光デバイスによれば、信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10Gbps程度の高速伝送が可能で、多重信号光の分波及び合波を良好に行うことができる光デバイスを提供することができる。

本発明に係る第4の光デバイスによれば、信号光を入出

射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10 Gb/s程度の高速伝送が可能で、伝送される信号光のスイッチングが可能な光デバイスを提供することができる。

本発明に係る第5乃至6の光デバイスによれば、信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10 Gb/s程度の高速伝送が可能で、シート状マルチモード光伝送路の幅方向と長さ方向の大きさがコンパクトな光デバイスを提供することができる。

文献(1)に記載された技術のように、信号光の入出射方向とシート状光伝送路の光の伝送方向とを一致させると、入出射部分とシート状光伝送路とを損失なく結合することができる。すなわち、シート状光伝送路へ入射する信号光の強度ピークと、シート状光伝送路の屈折率分布とを調整することが容易であるため、入射時の信号光のロスを小さくすることができる。

しかしながら、光デバイスは、入射側にレーザなどの光部品を実装し、出射側にセンサーなどの光部品を実装する必要がある。このため、これらの光部品とシート状光伝送路とを結合する際に、光部品とシート状光伝送路との間の高さを調整する必要が生じ、光部品の実装に際して嵩上げを行わなければならないという問題があった。したがって、光デバイスをコンパクトにできなかった。

一方、文献(16)は、屈折率分布を備えていないシン

グルモードのシート状光伝送路に関する技術である。このため、文献（２）に記載された光導波路では、モード分散が発生し、ギガビットクラスの高周波の信号光をマルチモードで伝送できないという問題があった。

また、近年、マルチモード干渉を用いて、信号光を生成する光デバイスが提案されている。マルチモード干渉を用いると、入射した信号光を複数の信号光に分岐する光分岐器や、入射した複数の信号光を単一の信号光に合成する光合成器を、簡単に得ることができる。しかしながら、文献（１）及び文献（１６）のいずれにも、マルチモード干渉に関する記載は認められない。

そこで、本発明の第５の目的は、光部品の実装が簡単にでき、ギガビットクラスの高周波の信号光をマルチモードで伝送することが可能な光デバイスを提供することである。

また、本発明の第６の目的は、光部品の実装が簡単にでき、ギガビットクラスの高周波の信号光をマルチモードで伝送することが可能で、さらに、マルチモード干渉を用いて信号光を出射することができる光デバイスを提供することである。

上記第５の目的は、以下の構成を備えた第８の光デバイスにより達成される。

外部から入射する信号光を伝送し、伝送した信号光を外部へ出射する光デバイスであって、

第１方向に屈折率分布を含み、信号光を複数の光路によ

って第 1 方向に直交する第 2 方向に伝送できる光伝送路を備え、

光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸の内、少なくとも一方は、第 2 方向と平行でなく、

複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に光伝送路へ入射する二つの光路は、光伝送路へ入射する位相差と光伝送路から出射する位相差とが等しい。

以上の構成によれば、本発明に係る第 8 の光デバイスは、第 1 方向に屈折率分布を含み、信号光を複数の光路によって第 1 方向に直交する第 2 方向に伝送できる光伝送路を備えているから、モード分散抑制し、ギガビットクラスの高周波の信号光をマルチモードで伝送することができる。

また、光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸の内、少なくとも一方は、第 2 方向と平行でないので、光部品の実装に際して嵩上げをしなくてもよい。したがって、光デバイスの全体構成をコンパクトにできる。

さらに、信号光の複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に光伝送路へ入射する二つの光路は、光伝送路へ入射する位相差と光伝送路から出射する位相差とが等しいので、入射の際の信号光の強度分布をそのまま信号光として出射できる。すなわち、光伝送路により位相差が発生しないので、入射した強度分布のまま光伝送路から出射することができ、光伝送路から信号光を損失なく出射できる。

好ましくは、光デバイスは、以下の構成を備える。

光伝送路へ信号光を入射するための入射部と、

光伝送路から信号光を出射するための出射部とを備え、

入射部及び出射部の内、少なくとも一方は、内部を伝送する信号光の光軸が、第2方向と平行でない方向になるように、光伝送路と結合する。

この構成により、入射部又は出射部を、光伝送路の伝送方向端面に設ける必要がなくなる。したがって、光部品の実装に際して嵩上げをしなくてもよい。

好ましくは、入射部及び出射部の内、少なくとも一方は、内部を伝送する信号光の光軸が、第2方向と直交するように、光伝送路と結合している。

この構成により、外部と光伝送路とを簡単に結合することができる。例えば、光伝送路へ入射する信号光を発光する発光素子や光伝送路から出射した信号光を受光する受光素子などの光部品と、光伝送路とを結合する際に、光部品を簡単に実装できる。

好ましくは、上述の二つの光路は、伝送される信号光の波長の整数倍に等しい光学的な光路長差を持つ（以下、構成Aという）。構成Aを具備していることにより、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成Aにおいて、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を m 個（ $m = 1, 2, 3, \dots$ ）含み、 m 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和が、信号光の波長の自然数倍に等しい（以下、構成1という）。この構成により、二つの光路の位相差

をゼロにすることができる。

構成 1 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制しながら、信号光を伝送する。

構成 1 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含んでおり、光路長差発生部は、第 1 及び第 2 反射面により反射される二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である。

この構成により、第 1 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、及び第 1 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

構成 1 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路において、第 1 反射面により信号光のすべてが第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の j 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

構成 A において、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和がゼロである（以下、構成 2 という）。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 2 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制して、信号光を伝送する。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含んでおり、光路長差発生部は、第 1 及び第 2 反射面により反射される二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である。

この構成により、第 2 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、及び第 2 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路において、第 1 反射面により信号光のすべてが第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが第 2 反

射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

好ましくは、上述の二つの光路は、光学的な光路長差がゼロである（以下、構成 B という）。構成 B を具備していることにより、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 B において、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和がゼロである（以下、構成 2 という）。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 2 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制させて、信号光を伝送する。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含んでおり、光路長差発生部は、第 1 及び第 2 反射面により反射される二つ

の光路の屈折率履歴が異なる部分である。

この構成により、第2方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、及び第2方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

構成2において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路において、第1反射面により信号光のすべてが第2方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが第2反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 $(j = 0, 1, 2, 3 \dots)$ に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

構成Bにおいて、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない（以下、構成3という）。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成3において、好ましくは、光伝送路は、第1方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、第1方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第1方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。

構成3において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第2方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第2方向へ折り曲げるための第1反射面と、第

2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、中心部における第 1 反射面と第 2 反射面との間の物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $j/2$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しく、信号光は、第 1 反射面及び第 2 反射面上の、光伝送路の第 1 方向の厚さが半分となる中心部で、第 1 方向及び第 2 方向に共に直交する第 3 方向に平行な線状に集光される。

(この構成により、中心部における第 1 反射面と第 2 反射面との間が、光学的に共役関係となる。このため、第 1 反射面と第 2 反射面との間で、二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない。したがって、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

また、上記第 6 の目的は、以下の構成を備えた第 9 の光デバイスにより達成される。

(外部から入射する信号光を伝送し、伝送した信号光をマルチモード干渉によって所定の位置から外部へ出射する光デバイスであって、

第 1 方向に屈折率分布を含み、信号光を前記第 1 方向に直交する第 2 方向に伝送可能であり、前記第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路と、

前記シート状光伝送路へ信号光を入射するための M 個 ($M = 1, 2, 3 \dots$) の入射部と、

前記シート状光伝送路から信号光を出射するための N 個 ($N = 1, 2, 3 \dots$) の出射部とを備え、

前記 M 個の入射部及び前記 N 個の出射部は、内部を伝送

する信号光の光軸が前記第2方向と平行でない方向に前記シート状光伝送路と結合する少なくとも一つの非平行入出射部を含み、

前記非平行入出射部と対応する前記入射部又は前記出射部との間を伝送する信号光の複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に前記シート状光伝送路へ入射する二つの光路は、前記シート状光伝送路へ入射する位相差と前記シート状光伝送路から出射する位相差とが等しく、

前記M個の入射部及び前記N個の出射部は、すべて所定のマルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件を満足する位置に配置されていることを特徴とする。

以上の構成によれば、本発明に係る第9の光デバイスは、第1方向に屈折率分布を含み、信号光を複数の光路によって第1方向に直交する第2方向に伝送できる光伝送路を備えているから、モード分散を抑制し、ギガビットクラスの高周波の信号光をマルチモードで伝送することができる。

また、非平行入出射部を含むので、光部品の実装に際して嵩上げをしなくてもよい。したがって、光デバイスの全体構成をコンパクトにできる。

また、信号光の複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に光伝送路へ入射する二つの光路は、光伝送路へ入射する位相差と光伝送路から出射する位相差とが等しいので、入射の際の信号光の強度分布をそのまま信号光として出射できる。すなわち、光伝送路により位相差が発生しないので、入射した強度分布のまま光伝送路から出射す

ることができ、光伝送路から信号光を損失なく出射できる。

さらに、 M 個の入射部及び N 個の出射部は、すべて所定のマルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件を満足する位置に配置されているので、マルチモード干渉を用いて信号光を制御することができる。したがって、光分岐器や光合成器といった光デバイスを得ることができる。

好ましくは、非平行入射部は、内部を伝送する信号光の光軸が、第 2 方向と直交するように、光伝送路と結合する。この構成により、外部と光伝送路とを簡単に結合することができる。例えば、光伝送路へ入射する信号光を発光する発光素子や光伝送路から出射した信号光を受光する受光素子などの光部品と、光伝送路とを結合する際に、光部品を簡単に実装できる。

好ましくは、上述の二つの光路は、伝送される信号光の波長の整数倍に等しい光学的な光路長差を持つ（以下、構成 A という）。構成 A を具備していることにより、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 A において、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を m 個（ $m = 1, 2, 3 \dots$ ）含み、 m 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和が、信号光の波長の自然数倍に等しい（以下、構成 1 という）。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 1 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第

1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制し、信号光を伝送する。

構成 1 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含んでおり、光路長差発生部は、第 1 及び第 2 反射面により反射される二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である。

この構成により、第 1 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、及び第 1 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

構成 1 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路において、第 1 反射面により信号光のすべてが第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の j 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

構成 A において、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和がゼロである（以下、構成 2 という）。この構成によ

り、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 2 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制し、信号光を伝送する。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含んでおり、光路長差発生部は、第 1 及び第 2 反射面により反射される二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である。

この構成により、第 2 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、及び第 2 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路において、第 1 反射面により信号光のすべてが第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

好ましくは、上述の二つの光路は、光学的な光路長差がゼロである（以下、構成 B という）。構成 B を具備していることにより、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 B において、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個（ $n = 2, 3, 4, \dots$ ）含み、 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和がゼロである（以下、構成 2 という）。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 2 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制し、信号光を伝送する。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含んでおり、光路長差発生部は、第 1 及び第 2 反射面により反射される二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である。

この構成により、第 2 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、及び第 2 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

構成 2 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路において、第 1 反射面により信号光のすべてが第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

構成 B において、好ましくは、二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない（以下、構成 3 という）。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

構成 3 において、好ましくは、光伝送路は、第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。

構成 3 において、好ましくはさらに、上述のシート状光伝送路は、第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、中心部における第 1 反射面と第 2 反射面との間の物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $j/2$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しく、信号光は、第 1 反射面及び第 2 反射面上の、光伝送路の第 1 方向の厚さが半分となる中心部で、第 1 方向及び第 2 方向に

共に直交する第 3 方向に平行な線状に集光される。

この構成により、中心部における第 1 反射面と第 2 反射面との間が、光学的に共役関係となる。このため、第 1 反射面と第 2 反射面との間で、二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない。したがって、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

図面の簡単な説明

図 1 A は、本発明の実施の形態 1 に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。

図 1 B は、本発明の実施の形態 1 に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の断面図である。

図 2 は、本発明の実施の形態 2 に係る光 8 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。

図 3 は、本発明の実施の形態 3 に係る光デバイスである 2 信号ストレートシートバスの概要を示す斜視図である。

図 4 は、本発明の実施の形態 3 の変形例に係る光デバイスである 8 信号ストレートシートバスの概要を示す斜視図である。

図 5 は、本発明の実施の形態 4 に係る光デバイスである 2 信号クロスシートバスの概要を示す斜視図である。

図 6 は、本発明の実施の形態 4 の変形例に係る光デバイスである 8 信号クロスシートバスの概要を示す斜視図である。

図 7 は、本発明の実施の形態 5 に係る光デバイスである 2 信号スターカプラの概要を示す斜視図である。

図 8 A は、本発明の実施の形態 6 に係る光デバイスである片側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。

図 8 B は、本発明の実施の形態 6 の変形例 1 に係る光デバイスである両側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。

図 9 は、本発明の実施の形態 7 に係る光集積デバイスである光スイッチアレイの概要を示す斜視図である。

図 1 0 は、本発明の実施の形態 8 に係る光デバイスである 1 対双方向ストレートシートバスの概略構成を示す斜視図である。

図 1 1 は、本発明の実施の形態 8 の変形例に係る光デバイスである 4 対双方向ストレートシートバスの概要を示す斜視図である。

図 1 2 は、本発明の実施の形態 9 に係る光デバイスである 1 対双方向クロスシートバスの概略構成を示す斜視図である。

図 1 3 は、本発明の実施の形態 1 0 に係る光集積デバイスである 1 対ストレート双方向光バスアレイの構成概要図である。

図 1 4 は、本発明の実施の形態 1 1 に係る光集積デバイスである多層光バスの構成概要図である。

図 1 5 A は、屈折率分布スラブ導波路の入出射方式の一例を示す斜視図である。

図 1 5 B は、屈折率分布スラブ導波路の入出射方式の他

の例を示す斜視図である。

図 1 6 は、屈折率分布スラブ導波路の入出射方式のさらに他の例を示す斜視図である。

図 1 7 A は、屈折率分布スラブ導波路の形状の一例を示す斜視図である。

図 1 7 B は、屈折率分布スラブ導波路の形状の他の例を示す斜視図である。

図 1 8 は、光 2 分岐の場合の B P M (B e a m P r o p a g a t i o n M e t h o d) シミュレーション結果である。

図 1 9 は、本発明に係る 3 個の入出力光を持つスターカプラの屈折率分布スラブ導波路を示す上面図である。

図 2 0 A は、本発明の実施の形態 6 の変形例 2 に係る光デバイスである片側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。

図 2 0 B は、本発明の実施の形態 6 の変形例 3 に係る光デバイスである両側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。

図 2 1 A は、本発明の実施の形態 1 2 に係る光分波を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。

図 2 1 B は、本発明の実施の形態 1 2 に係る光分波を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の断面図である。

図 2 2 A は、屈折率分布スラブ導波路に $1.30\mu\text{m}$ の信号光を伝送させた場合の B P M シミュレーション結果である。

図 2 2 B は、屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 に 1 . 5 μ m の信号光を伝送させた場合の B P M シミュレーション結果である。

図 2 3 は、本発明の実施の形態 1 3 に係る光 2 分岐器である光デバイスの構成概要図である。

図 2 4 は、本発明の実施の形態 1 3 の変形例 1 に係る 3 個以上の信号光の間隔拡大のための光デバイスの要部を示す上面図である。

図 2 5 は、本発明の実施の形態 1 3 の変形例 2 に係る信号光の間隔拡大のための光デバイスの要部を示す上面図である。

図 2 6 は、本発明の実施の形態 1 4 に係るビーム変換部を有する光デバイスの構成の概要を示す斜視図である。

図 2 7 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 1 に係る光デバイスの構成の概要を示す斜視図である。

図 2 8 A は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 2 に係る光デバイスの構成の概要を示す上面図である。

図 2 8 B は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 2 に係る光デバイスの出射側ビーム変換部の一例を示す断面図である。

図 2 8 C は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 2 に係る光デバイスの出射側ビーム変換部の他の例を示す断面図である。

図 2 9 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 3 に係る光デバイスの構成の概要を示す斜視図である。

図 3 0 は、屈折率分布スラブ導波路の製造方法の一例を

示す説明図である。

図 3 1 は、屈折率分布スラブ導波路の製造方法の他の例を示す説明図である。

図 3 2 は、ポリシランを用いた屈折率分布のメカニズムを説明する説明図である。

図 3 3 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 1 に係る光デバイスの製造方法を説明する説明図である。

図 3 4 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 1 に係る光デバイスの製造方法の別例を説明する説明図である。

図 3 5 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 1 に係る光デバイスの製造方法の別例を説明する説明図である。

図 3 6 A は、本発明の実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器の斜視図である。

図 3 6 B は、マルチモード干渉二分岐器の正面図である。

図 3 7 は、本発明の実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 3 8 A は、シート状光伝送路及び入射部を図 3 6 A 中の C - D - G - H 面を含む平面で切断した断面である。

図 3 8 B は、シート状光伝送路の屈折率分布を表すグラフである。

図 3 9 は、本発明の実施の形態 1 6 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 0 は、本発明の実施の形態 1 7 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 1 A は、本発明の実施の形態 1 8 に係るマルチモー

ド干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 1 B は、本発明の実施の形態 1 9 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 2 A は、本発明の実施の形態 2 0 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 2 B は、本発明の実施の形態 2 1 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 3 A は、本発明の実施の形態 2 2 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 3 B は、本発明の実施の形態 2 3 に係るマルチモード干渉二分岐器の信号光が伝送される部分の断面図である。

図 4 4 は、実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器の構成を表す斜視図である。

図 4 5 は、実施の形態 1 5 に係るシート状光伝送路の部分断面図である。

図 4 6 A ～ D は、いずれも光デバイスの入出力構成の例を示す模式図である。

図 4 7 A は、本発明の実施の形態 2 4 に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。

図 4 7 B は、本発明の実施の形態 2 4 の変形例に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、本発明の実施の形態について図面を参照して説明する。なお、本発明は下記の実施の形態に限定されるものではない。また、本発明は、下記の実施の形態をそれぞれ組み合わせたものも含む。なお、各実施の形態に係る屈折率分布スラブ導波路において、 z 軸に平行な方向を長さ方向と、 y 軸に平行な方向を厚さ方向と、 x 軸に平行な方向を幅方向とそれぞれ定義する。特に、 z 軸の正に向かう方向を伝送方向と定義する。 $x y z$ 軸は、3次元直交座標系を構成する。また、各実施の形態に係る屈折率分布スラブ導波路において、 x 軸に平行な方向の大きさをスラブ幅 (W) と、 y 軸に平行な方向の大きさをスラブ厚 (D) と、 z 軸に平行な方向の大きさをスラブ長 L とする。特に指定しない限り、各図において、屈折率分布は、図中に示された濃淡により模式的に表わされており、濃淡が濃い程屈折率が高いことを示す。

(実施の形態 1)

図 1 A は、本発明の実施の形態 1 に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路 1 0 1 の概要を示す斜視図である。図 1 B は、本発明の実施の形態 1 に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路 1 0 1 の断面図である。図 1 8 は、光 2 分岐の場合の B P M (B

e a m P r o p a g a t i o n M e t h o d) シミュレーション結果である。

実施の形態 1 に係る光デバイスは、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 101 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 101 は、図 1 A に示すように、 xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 101 は、厚さ方向の中心位置に最大屈折率 n_{max} を持ち、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない厚さ方向の屈折率分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 101 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。屈折率分布スラブ導波路 101 は、入射面 102 と、出射面 103 とを含む。入射面 102 は、幅方向の中心位置に入射光 107 を入射させる入射部（図示せず）に対向する。出射面 103 は、幅方向の中心に対して対称な位置から出射する 2 個の出射光 108 を受光する出射部（図示せず）に対向する。入射部は、信号光に対応する入射光 107 を入射面 102 の幅方向の中心位置に入射させる。入射光 107 は、屈折率分布スラブ導波路 101 の内部を伝送される。入射光 107 は、屈折率分布スラブ導波路 101 の内部で、後述するマルチモード干渉のセルフイメージング原理に従って 2 分岐され、出射面 103 の幅方向に離れた位置から 2 個の出射光 108 として出射し出射部に至る。

屈折率分布スラブ導波路 101 のスラブ長 L は、ほぼ $n_0 \times W_0^2 / (2\lambda)$ であり、2 個の出射光 108 の出射位置の幅方向の間隔 D_1 は、ほぼ $W_0 / 2$ である。ここ

で、 W_0 は、屈折率分布スラブ導波路 101 の幅方向の基本モードの幅を、 n_0 は、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率をそれぞれ表す。実効屈折率 n_0 は、厚さ方向の最大屈折率 n_{max} と屈折率分布スラブ導波路 101 の形状とにより決定される定数である。ただし、スラブ長 L が、 $n_0 \times W_0^2 / (2\lambda)$ に一致する位置から以降は、セルフイメージング原理により、 $n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の長さ毎に同様の出力が繰り返される。したがって、スラブ長 L を、 $n_0 \times W_0^2 / (2\lambda)$ の奇数倍とすることで、所望の大きさになるようにスラブ長 L を調節することができる。

たとえば、図 1 A に示す屈折率分布スラブ導波路 101 において、幅方向に励起した 0 次モード光に対する実効屈折率 n_0 を約 1.5 とし、伝送される光の波長 λ を $1.30 \mu m$ とし、屈折率分布スラブ導波路 101 のスラブ幅 W を $400 \mu m$ とし、屈折率分布スラブ導波路 101 のスラブ厚 D を $50 \mu m$ とした場合を考える。屈折率分布スラブ導波路 101 の幅方向の基本モードの幅 W_0 は、屈折率分布スラブ導波路 101 の周囲の屈折率 n_1 に依存する。屈折率分布スラブ導波路 101 の周囲が空気 ($n_1 = 1$) の場合、 W_0 の値が $400.16 \mu m$ となるので、屈折率分布スラブ導波路 101 の最短のスラブ長 L の値は、約 $92,400 \mu m$ となる。このとき、出射光 108 の出射位置間隔 D_1 の値は、 $200.08 \mu m$ となる。図 18 に、以上の条件に基づいて実施した BPM シミュレーションの結果を示す。図 18 において、入射面 102 の幅方向

の中心位置に入射した1個の入射光107が、長さ方向に沿ってマルチモード干渉しながら5分岐、4分岐、3分岐と変化し、最終的には出射面103で設計通り2分岐となる様子がわかる。

屈折率分布スラブ導波路101の厚さ方向の屈折率分布は、例えば、(数1)に示すように厚さ方向の中心に位置する厚さ方向の中心位置の最大屈折率 n_{\max} と、中心位置から厚さ方向に離れる距離 r と屈折率分布定数 $A^{1/2}$ とで近似的に表される。

$$n = n_{\max} \left(1 - A \frac{r^2}{2} \right) \quad (\text{数1})$$

なお、実際の屈折率分布は、製造プロセスの制御の困難性から(数1)と完全に一致させることは困難である。実施の形態1に係る屈折率分布スラブ導波路101は、中心近傍に最大屈折率部分を形成し、最大屈折率部分からの距離に従って(数1)で規定するような放物線に従って低下する構成を有している。

実際には、屈折率分布スラブ導波路101を伝送される信号光は、幅方向に複数モードが励起されており、モードごとに実効屈折率が異なっている。後述するように、MMIにおいて、長さ方向の大きさは、幅方向に励起される0次モード光の実効屈折率の関数になるので、最大屈折率 n_{\max} を幅方向に励起される0次モード光の実効屈折率 n_0 に置換した方が都合がよい。したがって、以下の議論において、屈折率として幅方向に励起される0次モード光

の実効屈折率 n_0 を用いることにする。なお、実効屈折率 n_0 は、最大屈折率 n_{max} と、信号光の波長と、シート状光伝送路の形状により決定される。

屈折率分布定数は、屈折率分布スラブ導波路 101 中を伝送する光が、膜厚から外へ出ないように、屈折率分布スラブ導波路 101 の膜厚と入射光 107 のプロファイルとに応じて最適化される。例えば、屈折率分布スラブ導波路 101 の膜厚に対して、入射光 107 の広がり角度が大きい場合は、屈折率分布定数を大きくする。逆に、入射光 107 の広がり角度が小さい場合は、屈折率分布定数を小さくする。また、入射光 107 のビーム径に合わせて屈折率分布スラブ導波路 101 の膜厚を調整すると結合ロスを低減できる。なお、屈折率分布は（数 1）に示すような連続的な変化でなくてもよく、中心からの距離の関数として階段状に変化しても問題無い。

次に、屈折率分布スラブ導波路 101 の入射面 102 に幅方向の中心線に対称に入射する入射光を入射した時に、出射面 103 側で幅方向の中心線に対称に 2 分岐するメカニズムを説明する。ただし、（i）厚さ方向の中心面内を伝送する光の場合（図 1 B において A と記載した光路を伝送する信号光）と、（ii）厚さ方向の中心面内を伝送しない光とに分けて説明する。（ii）の厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、中心面に軸ずれ角度を有して入射する入射光の場合（図 1 B において B と記載した光路を伝送する信号光）と、中心面から位置ずれ（軸ずれ）した位置に入射する入射光の場合（図 1 B において C と記載した光

路を伝送する信号光)との2つの信号光が存在する。(i)
) 厚さ方向の中心面内を伝送する光は、厚さ方向の屈折率
分布の影響を受けない。一方、(ii) 厚さ方向の中心面
内を伝送しない光は、厚さ方向の屈折率分布の影響を受け
る。

屈折率分布スラブ導波路101において、(i) 厚さ方
向の中心面内を伝送する光の振る舞いは、実質的に実効屈
折率 n_0 しか感じないので、文献(11)に記載された
スラブ導波路において一定屈折率を、幅方向に励起する0
次モードに対する実効屈折率 n_0 とした場合と等価であ
る。したがって、屈折率分布スラブ導波路101の厚さ方
向の中心面内を伝送する入射光に対する出射光の状態は、
屈折率が n_0 で一定のスラブ導波路の幅方向に励起する
マルチモードのモード分散によって、スラブ長 L に応じて
変化する。ただし、出射光の状態が変化することは、入射光
と同じ像の数と出射位置とが変化することを意味する。実
施の形態1に係る屈折率分布スラブ導波路101の場合、
スラブ長 L を、ほぼ $n_0 \times W_0^2 / \lambda / 2$ に一致させ、入
射面102の幅方向の中心位置に1個の入射光107を入
射させることにより、出射面103に入射光107と同じ
像が、幅方向の中心に対称にほぼ $W_0 / 2$ だけ離れた間
隔に形成されよう構成している。屈折率分布スラブ導波
路101は、出射面103に形成された2個の像を、2個
の出射光108として出力している。2個の出射光108
は、入射光107と同じ像を出力したものであるため、そ
れぞれ同じプロファイルを持つ。

このようなマルチモード干渉（MMI：Multi-Mode Interference）のセルフイメージング原理を利用することにより、幅方向の入射位置に応じて、以下の（１）及び（２）に示す機能を持つデバイスを作成することができる。

（１）非対称入射：

一定屈折率 n_0 を有するスラブ導波路において、幅方向の中心から x だけずれた入射光に対して、入射光と同じプロファイルを有する出射光が、下記の（数２）～（数８）に示すようにスラブ長 L に応じて位置と数とを変化させて出射面から出射する。ただし、 p 及び N は、整数である。また、整数 p は $(p \pm 1 / N)$ が正となる整数である。

（１－１）

$$L = p \frac{8n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (\text{数2})$$

スラブ長 L が（数２）を満足することにより、出射面の幅方向において入射光に対応する位置、すなわち幅方向の中心から入射光の場合と同方向に x だけずれた位置に、出射光を出射させることができる。

（１－２）

$$L = (2p+1) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (\text{数3})$$

スラブ長 L が（数３）を満足することにより、出射面の幅方向において入射光と幅方向の中心に対称な位置、すなわち幅方向の中心から入射光の場合と逆方向に x だけずれた位置に、出射光を出射させることができる。

(1 - 3)

$$L = \left(p \pm \frac{1}{N} \right) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (\text{数4})$$

スラブ長 L が (数 4) を満足することにより、出射面の幅方向において入射光に対応する位置、すなわち幅方向の中心から入射光の場合と同方向に x だけずれた位置と、出射面の幅方向において入射光と幅方向の中心に対称な位置、すなわち幅方向の中心から入射光の場合と逆方向に x だけずれた位置との間の N カ所に、 N 個の出射光を出射させることができる。

なお、入射光が 2 個で、入射位置がそれぞれ中心から約 $\pm W_0 / 6$ ずれている場合は、スラブ長 L は下記のように (1 - 1) から (1 - 3) で述べたスラブ長 L に対して $1 / 3$ の長さになる。

(1 - 1)

$$L = p \frac{8n_0 W_0^2}{3\lambda} \quad (\text{数5})$$

(1 - 2)

$$L = (2p + 1) \frac{4n_0 W_0^2}{3\lambda} \quad (\text{数6})$$

(1 - 3)

$$L = \left(p \pm \frac{1}{N} \right) \frac{4n_0 W_0^2}{3\lambda} \quad (\text{数7})$$

(2) 対 称 中 心 入 射 :

一定屈折率 n_0 を有するスラブ導波路において、幅方向の中心に対して対称に入射する入射光に対して、入射光と

同じプロファイルを有する出射光が、下記の（数8）に示すようにスラブ長 L に応じて位置と数とを変化させて出射面から出射する。ただし、 p 及び N は、整数である。また、整数 p は $(p \pm 1 / N)$ が正となる整数である。

$$L = \left(p \pm \frac{1}{N} \right) \frac{n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (\text{数8})$$

スラブ長 L が（数8）を満足することにより、出射面の幅方向の中心対称に N 個の出射光が各 W_0 / N の間隔で出射する。

なお、複数個の入射光が有る場合は、各入射光について個別に出射光を求め、対応する出射光を重ね合わせればよい。

実施の形態1に係る屈折率分布スラブ導波路101の厚さ方向の中心面内を伝送する光は、（数8）において、屈折率 n_0 、 $N = 2$ とした場合に相当する。したがって、入射光は出射端で2分岐される。

一方、（ii）厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、厚さ方向の屈折率分布の影響を受けるので、図1Bに示すように、中心面に沿って厚さ方向に蛇行しながら伝播する。すなわち、中心面から離れる方向へ進む光は、常に相対的に屈折率が高い部分から小さい部分へ進むので、進むにつれて徐々に進行方向と厚さ方向のなす角度が大きくなり、中心軸から最も離れた位置で 90° なる。また、中心面へ近づく方向へ進む光は、常に相対的に屈折率が小さい部分から大きい部分へ進むので、進むにつれて徐々に進行方向と厚さ方向のなす角度が小さくなり、中心面と交差す

る位置で最小となる。(i i) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、蛇行しながらも感じる屈折率は常に中心の屈折率よりも小さいので、(i) 厚さ方向の中心軸上を伝送する光よりも速度は早くなる。

ここで、屈折率分布が(数 1) に示す 2 次関数の屈折率分布である場合、(i i) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光の中心面に平行な伝送速度の成分は、(i) 厚さ方向の中心面内を伝送する光の伝送速度と等しくなる。このことは、厚さ方向のモード分散がないことを意味している。従って、入射光の(i i) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光の中心面に平行な成分(蛇行する光の厚さ方向に垂直な方向成分)は、(i) 厚さ方向の中心面内を伝送する光と同様に、出射面で幅方向の中心に対して対称に 2 分岐される。

射光の(i i) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光の中心面に垂直な成分(蛇行する光の厚さ方向成分)は、蛇行する光の伝播位置に応じて変化するので、出射光の状態は特定できない。ところが、この蛇行する光の厚さ方向成分は、厚さ方向のモード分散がないので、モード分散に起因する信号波形の乱れの影響を受けない。このため、あたかも幅方向についてもモード分散の影響が無い場合と等価の振る舞いをする。従って、2 個の出射光は、それぞれ入射光と同じ像を有することになる。以上の結果から、(i i) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光(蛇行する光)は、(i) の場合と同じようにスラブ導波路形状に応じて幅方向の中心対称に入射光と同じ像として 2 分岐される。

上記の説明のように、入射光は屈折率分布スラブ導波路 101 の厚さ方向の全ての固有モードについて等しく 2 分岐するので、入射面の幅方向の中心位置に入射光が入射すれば、厚さ方向の中心からの位置ずれや大きな広がり角度を有している場合であっても 2 分岐として機能する光デバイスを得ることができる。なお、入射光の幅方向の中心からの位置ずれは出射光の分岐比のアンバランスの原因となるので、同等の出射光を得たい場合、できるだけ位置ずれが無い方が良い。しかしながら、この位置ずれを積極的に利用して分岐比の調整をすることも可能である。

以上のように、実施の形態 1 の光 2 分岐デバイスは、以下の式で表される値の奇数倍であるスラブ長 L を持つ屈折率分布スラブ導波路を有しているので、屈折率分布スラブ導波路の入射面の幅方向の中心に入射した入射光を、出射面の幅方向の中心に対称に 2 個の出射光を生成して出力することができる。

$$\frac{n_0 W_0^2}{2\lambda}$$

なお、実施の形態 1 の光 2 分岐デバイスの入射面と出射面とを入れ替えて、光 2 合成デバイスとして使用することができる。この場合は、入射面の幅方向の中心位置に対称に 2 個の入射光を入射させ、出射面の幅方向の中心に 1 個の出射光を出射させる。光 2 合成デバイスのスラブ長 L は、光 2 分岐デバイスのスラブ長 L と等しい。

(実施の形態 2)

図 2 は、本発明の実施の形態 2 に係る光 8 分岐を行う光

デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。実施の形態 2 に係る光デバイスは、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 201 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 201 は、図 2 に示すように、 xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 201 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 201 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。屈折率分布スラブ導波路 201 は、入射面 202 と、出射面 203 とを含む。入射面 202 は、幅方向の中心位置に入射光 207 を入射させる入射部（図示せず）に対向する。出射面 203 は、幅方向の中心に対して対称な位置から出射する 8 個の出射光 208 を受光する受光部 220 に対向する。また、実施の形態 2 に係る光デバイス 200 は、アレイ O/E 変換部 221 と、出力電気線（バス）222 とを備える。アレイ O/E 変換部 221 は、8 個の受光部 220 を含む。アレイ O/E 変換部 221 は、出力電気線 222 に接続される。

実施の形態 2 において、スラブ長 L を、ほぼ $n_0 \times W_0^2 / (8\lambda)$ に一致させ、8 個の出射光 208 の出射位置間隔 D_1 を、ほぼ $W_0 / 8$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率を n_0 とする。スラブ長 L 及び出射位置間隔 D_1 をこれらの値に設定することにより、出射面に 8 個の入射光と同じ像が、幅方向の中心に対称にほぼ $W_0 / 8$ だけ離れた間隔に形成さ

れる。実施の形態 2 に係る屈折率分布スラブ導波路 201 は、この出射面 203 に形成された 8 個の像を、8 個の出射光 208 として出力している。8 個の出射光 208 は、入射光 207 と同じ像を出力したものであるため、それぞれ同じプロファイルを持つ。なお、セルフイメージング原理によれば、以下に示す数式の値の長さ毎に同様の現象が現れるので、整数 p を変化させることによりスラブ長 L を用途に応じて調節することができる。なお、詳細な 8 分岐のメカニズムおよび、高速伝送であっても厚さ方向と幅方向で信号光波形の乱れが無いメカニズムは、実施の形態 1 と同様である。

$$\left(p \pm \frac{1}{8}\right) \frac{nW_0^2}{\lambda} \quad (p \text{ はかっこ内を正にする整数})$$

以上の構成により、入射光 207 は、信号光として入射面 202 の幅方向の中心に入射し、屈折率分布スラブ導波路 201 の内部を伝送される。信号光は、屈折率分布スラブ導波路 201 の内部で、MMI のセルフイメージング原理に従って 8 分岐され、出射面 203 の幅方向に離れた位置から 8 個の出射光 208 として出射し 8 個の受光部 220 に至る。各受光部 220 で受光した信号光は、アレイ O/E 変換部 221 で電気信号に変化され、出力電気線（バス）222 から外部へ出力される。

また、実施の形態 2 に係る光デバイスは、出射面から出射した出射光 208 を受光する受光部 220 がアレイ O/E 変換部 221 に形成され、アレイ O/E 変換部 221 が出力電気線 222 に接続されている。この構成により、屈

折率分布スラブ導波路 201 から出力される出射光が省スペースで電気信号に変換されるため、出射光を光ファイバ等に接続するカプラが不要となる。したがって、実施の形態 2 に係る光デバイスは、調整容易でコンパクトに構成することができる。

以上のように、実施の形態 2 の光 8 分岐デバイスは、以下の式で表される値のスラブ長 L を持つ屈折率分布スラブ導波路を有しているので、屈折率分布スラブ導波路の入射面の幅方向の中心に入射した入射光を、出射面の幅方向の中心に対称に 8 個の出射光を生成して出力することができる。

$$\left(p \pm \frac{1}{8}\right) \frac{nW_0^2}{\lambda} \quad (p \text{ はかつこ内を正にする整数})$$

なお、実施の形態 2 の光 8 分岐デバイスの入射面と出射面とを入れ替えて、光 8 合成デバイスとして使用することができる。この場合は、入射面の幅方向の中心位置に対称に 8 個の入射光を入射させ、出射面の幅方向の中心に 1 個の出射光を出射させる。光 8 合成デバイスのスラブ長 L は、光 2 分岐デバイスのスラブ長 L と等しい。

実施の形態 1 は光 2 分岐デバイスの例、実施の形態 2 は光 8 分岐の例を示したが、一般に光 N 分岐デバイス ($N = 1, 2, 3 \dots$) についても同様に設計することが可能である。この場合、以下の式の値を満足するスラブ長 L を持つ屈折率分布スラブ導波路の入射面の幅方向の中心位置に 1 個の入射光を入射させることにより、出射面の幅方向の中心対称に N 個の出射光を得ることができる。

$$\left(p \pm \frac{1}{N}\right) \frac{nW_0^2}{\lambda} \quad (p \text{はかっこ内を正にする整数})$$

光 N 合成デバイスの場合、同様のスラブ長を持つ屈折率分布スラブ導波路の入射面の幅方向の中心対称に N 個の入射光を入射させることにより、出射面の中心に 1 個の出射光を得ることができる。

(実施の形態 3)

図 3 は、本発明の実施の形態 3 に係る光デバイスである 2 信号ストレートシートバスの概要を示す斜視図である。実施の形態 3 に係る光デバイスは、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 301 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 301 は、図 3 に示すように、x z 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 301 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 301 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。実施の形態 3 に係る光デバイスは、アレイ E/O 変換部 332 と、入力電気線（バス）333 と、アレイ O/E 変換部 336 と、出力電気線（バス）337 とを備える。

アレイ E/O 変換部 332 は、第 1 の発光部 330 と、第 2 の発光部 331 を含む。第 1 の発光部 330 は、屈折率分布スラブ導波路 301 の入射面 302 において幅方向の任意の位置に第 1 光 338（波長： λ ）を入射させる。第 2 の発光部 331 は、屈折率分布スラブ導波路 301 の入射面において幅方向の任意の位置に、第 1 光と同一波長

の第2光339を入射させる。また、アレイE/O変換部332は、入力電気線（バス）333と接続される。アレイE/O変換部332は、入力電気線333から入力される外部電気信号を、第1の発光部330と第2の発光部331とから放射される信号光に変換する。

アレイO/E変換部336は、第1の受光部334と、第2の受光部335とを含む。第1の受光部334は、屈折率分布スラブ導波路301の出射面303において第1の発光部330と幅方向の位置が同一である位置に配置される。第2の受光部335は、屈折率分布スラブ導波路301の出射面において第2の発光部331と幅方向の位置が同一である位置に配置される。また、アレイO/E変換部336は、出力電気線（バス）337と接続される。アレイO/E変換部336は、第1の受光部334と第2の受光部335とで受光する信号光を電気信号に変換し、出力電気線337へ出力する。

屈折率分布スラブ導波路301は、スラブ長 L を、ほぼ $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する0次モード光の実効屈折率を n_0 とする。屈折率分布スラブ導波路301のスラブ長 L は、実施の形態1で説明した（1）非対称入射の（数2）において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。スラブ長 L をこのように設定することにより、第1の発光部330から入射した第1光338は、第1の受光部334付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。同様に、第2の発光部331から入射した第2光339は、第2

の受光部 3 3 5 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。なお、セルフイメージング原理によれば $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の長さ毎に同様の現象が現れるので、スラブ長 L を $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の整数倍にすることにより、用途に応じて屈折率分布スラブ導波路 3 0 1 の長さを調節することができる。なお、詳細な分岐のメカニズムおよび、高速伝送であっても厚さ方向と幅方向で信号光波形の乱れが無いメカニズムは、実施の形態 1 と同様である。

以上の構成により、入力電気線 3 3 3 から外部電気信号がアレイ E / O 変換部 3 3 2 に入力されると、アレイ E / O 変換部 3 3 2 は、外部電気信号を第 1 の発光部 3 3 0 から放射される第 1 光 3 3 8 と第 2 の発光部 3 3 1 とから放射される第 2 光 3 3 9 とに変換する。第 1 の発光部 3 3 0 から放射された第 1 光 3 3 8 は、入射面 3 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 3 0 1 に入射して伝送される。第 1 光 3 3 8 は、セルフイメージング原理に従って、第 1 の受光部 3 3 4 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第 1 光 3 3 8 は、出射面 3 0 3 から第 1 の受光部 3 3 4 へ出力される。一方、第 2 の発光部 3 3 1 から放射された第 2 光 3 3 9 は、入射面 3 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 3 0 1 に入射して伝送される。第 2 光 3 3 9 は、セルフイメージング原理に従って、第 2 の受光部 3 3 5 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第 2 光 3 3 9 は、出射面 3 0 3 から第 1 の受光部 3 3 5 へ出力される。第 1 の受光部

334は、受光した第1光338に応じた電気信号を出力する。第2の受光部335は、受光した第2光339に応じた電気信号を出力する。出力された電気信号は、出力電気線337から外部へ出力される。このように、MMIを利用することで、2個の信号光をストレートに伝送するのに個別の光導波路を用意する必要が無く、1個の屈折率分布スラブ導波路301で独立して伝送することができる。

図4は、本発明の実施の形態3の変形例に係る光デバイスである8信号ストレートシートバスの概要を示す斜視図である。変形例の光デバイスは、前述した2信号ストレートシートバスと概略構成を同じくする。変形例の光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路401と、アレイE/O変換部432と、入力電気線（バス）333と、アレイO/E変換部436と、出力電気線（バス）337とを備える。アレイE/O変換部432は、2信号ストレートシートバスのアレイE/O変換部332と概略同一の構成を有するが、第1の発光部330及び第2の発光部331の代わりに8個の発光部からなる発光部群446が形成されている点で相違する。また、アレイO/E変換部436は、2信号ストレートシートバスのアレイO/E変換部336と概略同一の構成を有するが、第1の受光部334及び第2の受光部335の代わりに8個の受光部からなる受光部群447が形成されている点で相違する。発光部群446に含まれる発光部は、すべて受光部群447に含まれる受光部と幅方向の位置が対応している。

発光部群446は、入力電気線333から入力された外

部電気信号に基づいて、すべて同一波長の8個の信号光である第1光438～第8光445を、入射面402からそれぞれ独立に屈折率分布スラブ導波路401へ入射させる。屈折率分布スラブ導波路401は、第1光438～第8光445を伝送する。第1光438～第8光445は、屈折率分布スラブ導波路301の場合と同様に、出射面403から出射され受光部群447の内の幅方向の位置が同一である受光部へ受光される。8個の入射光が独立して出射端の幅方向の平行位置に現れる原理は、実施の形態1で説明した(1)非対称入射の(数2)において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。このように、MMIを利用することで、8個の信号光をストレートに伝送するのに個別の光導波路を用意する必要が無く、1個の屈折率分布スラブ導波路401で独立して伝送することができる。

実施の形態3は2信号ストレートシートバス及び8信号ストレートシートバスの例を示したが、一般にN信号ストレートシートバス(N=1, 2, 3・・・)についても同様に設計することが可能である。この場合、ほぼ以下の式の整数倍の値であるスラブ長Lを持つ屈折率分布スラブ導波路の入射面の任意の位置にN個の入射光を入射させることにより、出射面の幅方向の位置が同一の位置からN個の出射光を得ることができる。

$$\frac{8n_0W_0^2}{\lambda}$$

(実施の形態4)

図 5 は、本発明の実施の形態 4 に係る光デバイスである 2 信号クロスシートバスの概要を示す斜視図である。実施の形態 4 に係る光デバイスは、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 は、図 5 に示すように、 xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。実施の形態 5 に係る光デバイスは、アレイ E / O 変換部 5 3 2 と、入力電気線（バス）3 3 3 と、アレイ O / E 変換部 5 3 6 と、出力電気線（バス）3 3 7 とを備える。

アレイ E / O 変換部 5 3 2 は、第 1 の発光部 5 3 0 と、第 2 の発光部 5 3 1 を含む。第 1 の発光部 5 3 0 は、屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 の入射面において幅方向の任意の位置に第 1 光 5 3 8（波長： λ ）を入射させる。第 2 の発光部 5 3 1 は、屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 の入射面において幅方向の任意の位置に第 1 光と同一波長の第 2 光 5 3 9 を入射させる。また、アレイ E / O 変換部 5 3 2 は、入力電気線（バス）3 3 3 と接続される。アレイ E / O 変換部 5 3 2 は、入力電気線 3 3 3 から入力される外部電気信号を、第 1 の発光部 5 3 0 と第 2 の発光部 5 3 1 とから放射される信号光に変換する。

アレイ O / E 変換部 5 3 6 は、第 1 の受光部 5 3 4 と、第 2 の受光部 5 3 5 とを含む。第 1 の受光部 5 3 4 は、屈

折率分布スラブ導波路 5 0 1 の出射面において第 2 の発光部 5 3 1 と幅方向の中心に対して対称な位置に配置される。第 2 の受光部 5 3 5 は、屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 の出射面において第 1 の発光部 5 3 0 と幅方向の中心に対して対称な位置に配置される。また、アレイ O/E 変換部 5 3 6 は、出力電気線（バス）3 3 7 と接続される。アレイ O/E 変換部 5 3 6 は、第 1 の受光部 5 3 4 と第 2 の受光部 5 3 5 とで受光する信号光を電気信号に変換し、出力電気線 3 3 7 へ出力する。

屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 は、スラブ長 L を、ほぼ $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率を n_0 とする。屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 のスラブ長 L は、実施の形態 1 で説明した (1) 非対称入射の (数 3) において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。スラブ長 L をこのように設定することにより、第 1 の発光部 5 3 0 から放射され、入射面 5 0 2 から入射した第 1 光 5 3 8 は、第 1 の受光部 5 3 4 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。同様に、第 2 の発光部 5 3 1 から放射され、入射面 5 0 2 から入射した第 2 光 5 3 9 は、第 2 の受光部 5 3 5 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。なお、セルフイメージング原理によれば $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の長さ毎に同様の現象が現れるので、スラブ長 L を $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の奇数倍にすることにより、用途に応じて屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 の長さを調節することができる。なお、詳細な分岐のメカニズ

ムおよび、高速伝送であっても厚さ方向と幅方向で信号光波形の乱れが無いメカニズムは、実施の形態1と同様である。

以上の構成により、入力電気線333から外部電気信号がアレイE/O変換部532に入力されると、アレイE/O変換部532は、外部電気信号を第1の発光部530から放射される第1光538と第2の発光部531とから放射される第2光539とに変換する。第1の発光部530から放射された第1光538は、入射面502から屈折率分布スラブ導波路501に入射して伝送される。第1光538は、セルフイメージング原理に従って、第1の受光部534付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第1光538は、出射面503から出射され第1の受光部534で受光される。一方、放射された第2光539は、入射面502から屈折率分布スラブ導波路501に入射して伝送される。第2光539は、セルフイメージング原理に従って、第2の受光部535付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第2光539は、出射面503から出射され第2の受光部535で出力される。第1の受光部534は、受光した第1光538に応じた電気信号を出力する。第2の受光部535は、受光した第2光539に応じた電気信号を出力する。出力された電気信号は、出力電気線337から外部へ出力される。このように、MMIを利用することで、2個の信号光をクロスさせて伝送するのに個別の光導波路を用意する必要が無く、1個の屈折率分布スラ

ブ導波路 5 0 1 で独立して伝送することができる。

図 6 は、本発明の実施の形態 4 の変形例に係る光デバイスである 8 信号クロスシートバスの概要を示す斜視図である。変形例の光デバイスは、前述した 2 信号クロスシートバスと概略構成を同じくする。変形例の光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路 6 0 1 と、アレイ E / O 変換部 6 3 2 と、入力電気線（バス） 3 3 3 と、アレイ O / E 変換部 6 3 6 と、出力電気線（バス） 3 3 7 とを備える。アレイ E / O 変換部 6 3 2 は、2 信号クロスシートバスのアレイ E / O 変換部 5 3 2 と概略同一の構成を有するが、第 1 の発光部 5 3 0 及び第 2 の発光部 5 3 1 の代わりに 8 個の発光部からなる発光部群 6 4 6 が形成されている点で相違する。また、アレイ O / E 変換部 6 3 6 は、2 信号ストレートバスのアレイ O / E 変換部 5 3 6 と概略同一の構成を有するが、第 1 の受光部 5 3 4 及び第 2 の受光部 5 3 5 の代わりに 8 個の受光部からなる受光部群 6 4 7 が形成されている点で相違する。発光部群 6 4 0 に含まれる発光部は、すべて受光部群 6 4 7 に含まれる受光部と幅方向の中心に対して対称な位置に配置されている。

発光部群 6 4 6 は、入力電気線 3 3 3 から入力された外部電気信号に基づいて、すべて同一波長の 8 個の信号光である第 1 光 6 3 8 ~ 第 8 光 6 4 5 をそれぞれ独立に、入射面 5 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 6 0 1 へ入射させる。屈折率分布スラブ導波路 6 0 1 は、第 1 光 6 3 8 ~ 第 8 光 6 4 5 を伝送する。第 1 光 6 3 8 ~ 第 8 光 6 4 5 は、屈折率分布スラブ導波路 5 0 1 の場合と同様に、出射面 6 0

3 から出射され受光部群 6 4 7 の内の幅方向の中心に対称な受光部から出力される。8 個の入射光が独立して出射端の幅方向の平行位置に現れる原理は、実施の形態 1 で説明した (1) 非対称入射の (数 3) において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。このように、MMI を利用することで、8 個の信号光をクロスして伝送するのに個別の光導波路を用意する必要が無く、1 個の屈折率分布スラブ導波路 6 0 1 で独立して伝送することができる。

実施の形態 3 は 2 信号クロスシートバス及び 8 信号クロスシートバスの例を示したが、一般に N 信号クロスシートバス (N = 1, 2, 3 ···) についても同様に設計することが可能である。この場合、ほぼ以下の式の奇数倍の値であるスラブ長 L を持つ屈折率分布スラブ導波路の入射面の任意の位置に N 個の入射光を入射させることにより、出射面の幅方向の中心に対称な位置と同一の位置から N 個の出射光を得ることができる。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

(実施の形態 5)

図 7 は、本発明の実施の形態 5 に係る光デバイスである 2 信号スターカプラの概要を示す斜視図である。実施の形態 5 に係る光デバイスは、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 は、図 7 に示すように、x z 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を

有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。実施の形態 5 に係る光デバイスは、アレイ E / O 変換部 7 3 2 と、入力電気線（バス） 3 3 3 と、アレイ O / E 変換部 7 3 6 と、出力電気線（バス） 3 3 7 とを備える。

アレイ E / O 変換部 7 3 2 は、第 1 の発光部 7 3 0 と、第 2 の発光部 7 3 1 を含む。第 1 の発光部 7 3 0 は、屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 の入射面において幅方向の中心から所定の距離だけ離れた位置に第 1 光 7 3 8（波長： λ ）を入射させる。第 2 の発光部 7 3 1 は、屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 の入射面において第 1 の発光部 7 3 0 と幅方向の中心に対して対称な位置に第 1 光と同一波長の第 2 光 7 3 9 を入射させる。また、アレイ E / O 変換部 7 3 2 は、入力電気線（バス） 3 3 3 と接続される。アレイ E / O 変換部 7 3 2 は、入力電気線 3 3 3 から入力される外部電気信号を、第 1 の発光部 7 3 0 と第 2 の発光部 7 3 1 とから放射される信号光に変換する。

アレイ O / E 変換部 7 3 6 は、第 1 の受光部 7 3 4 と、第 2 の受光部 7 3 5 とを含む。第 1 の受光部 7 3 4 は、屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 の出射面において第 1 の発光部 7 3 0 と幅方向の位置が同一である位置に配置される。第 2 の受光部 7 3 5 は、屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 の出射面において第 2 の発光部 7 3 1 と幅方向の位置が同一である位置に配置される。また、アレイ O / E 変換部 7 3 6 は、出力電気線（バス） 3 3 7 と接続される。アレイ O

／E変換部736は、第1の受光部734と第2の受光部735とで受光する信号光を電気信号に変換し、出力電気線337へ出力する。

屈折率分布スラブ導波路701は、スラブ長Lを、ほぼ $2 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する0次モード光の実効屈折率を n_0 とする。屈折率分布スラブ導波路701のスラブ長Lは、実施の形態1で説明した(1)非対称入射の(数4)において、 $p = 0$ 及び $N = 2$ として、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。スラブ長Lをこのように設定することにより、第1の発光部730から放射され、入射面702から入射した第1光738は、第1の受光部734及び第2の受光部735付近に、入射した際と同じプロファイルを持つ2個の像を形成する。同様に、第2の発光部731から放射され入射面702から入射した第2光739は、第1の受光部734及び第2の受光部735付近に入射した際と同じプロファイルを持つ2個の像を形成する。なお、セルフイメージング原理によれば以下に示す数式の値の長さ毎に同様の現象が現れるので、スラブ長Lを(数10)のpの値を変化させることにより、用途に応じて屈折率分布スラブ導波路701の長さを調節することができる。

$$\left(p \pm \frac{1}{2}\right) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (p \text{はかつこ内を正にする整数})$$

なお、詳細な分岐のメカニズムおよび、高速伝送であっても厚さ方向と幅方向で信号光波形の乱れが無いメカニズムは、実施の形態1と同様である。

以上の構成により、入力電気線 3 3 3 から外部電気信号がアレイ E / O 変換部 7 3 2 に入力されると、アレイ E / O 変換部 7 3 2 は、外部電気信号を第 1 の発光部 7 3 0 から放射される第 1 光 7 3 8 と第 2 の発光部 7 3 1 とから放射される第 2 光 7 3 9 とに変換する。第 1 の発光部 7 3 0 から放射された第 1 光 7 3 8 は、入射面 7 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 に入射して伝送される。第 1 光 7 3 8 は、セルフイメージング原理に従って、第 1 の受光部 7 3 4 及び第 2 の受光部 7 3 5 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ 2 個の像を形成する。これにより、第 1 光 7 3 8 は、出射面 7 0 3 から出射し第 1 の受光部 7 3 4 及び第 2 の受光部 7 3 5 へ出力される。一方、第 2 の発光部 7 3 1 から放射された第 2 光 7 3 9 は、入射面 7 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 に入射して伝送される。第 2 光 7 3 9 は、セルフイメージング原理に従って、第 1 の受光部 7 3 4 及び第 2 の受光部 7 3 5 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ 2 個の像を形成する。これにより、第 2 光 7 3 9 は、出射面 7 0 3 から出射し第 2 の受光部 7 3 5 へ出力される。第 1 の受光部 7 3 4 は、受光した第 1 光 7 3 8 に応じた電気信号を出力する。第 2 の受光部 7 3 5 は、受光した第 2 光 7 3 9 に応じた電気信号を出力する。出力された電気信号は、出力電気線 3 3 7 から外部へ出力される。このように、MMI を利用することで、1 個の屈折率分布スラブ導波路 7 0 1 により 2 信号スターカプラを実現することができる。

以上の 2 信号スターカプラは、2 個の信号光を幅方向の

対称位置に入射し、2個の信号光を幅方向の対称位置に出射する光デバイスであったが、2個以上の信号光を入出力することも可能である。N（Nは偶数）個の信号光を幅方向の対称位置に入射し、N個の信号光を幅方向の対称位置に出射するスターカプラの場合、屈折率分布スラブ導波路のスラブ長Lは、以下の数式を満足する。

$$\left(p \pm \frac{1}{N_{EVEN}}\right) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (p \text{はかっこ内を正にする整数}, N_{EVEN} = 2, 4, 6 \dots)$$

上記数式において、pは整数であるので、pを変化させることにより屈折率分布スラブ導波路のスラブ長Lを所望の長さに調整することができる。特に、長さを調整する必要がない場合は、p = 0とすることにより、最短の屈折率分布スラブ導波路を得ることができる。

一方、N（Nは奇数）個の信号光を入射しN個の信号光を出射するスターカプラの場合、屈折率分布スラブ導波路のスラブ長Lは、以下の数式の値を満足する。

$$\left(p \pm \frac{1}{N_{ODD}}\right) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (p \text{はかっこ内を正にする整数}, N_{ODD} = 3, 5, 7 \dots)$$

上記数式は、偶数個の場合と形式は同一である。しかしながら、Nが奇数の場合、入出射される信号光の位置は幅方向に対称ではない。図19は、本発明に係る3個の入出力光を持つスターカプラの屈折率分布スラブ導波路を示す上面図である。図19において、すべて同一の波長λを有する第1光1902と、第2光1903と、第3光1904とは、屈折率分布スラブ導波路1901の入射面から入射する。第1光1902は、屈折率分布スラブ導波路190

1 の長さ方向に平行な一方の面から X だけ離れた位置に入射する。第 2 光 1 9 0 3 は、屈折率分布スラブ導波路 1 9 0 1 の長さ方向に平行な一方の面から $2W/3$ (W はスラブ幅) だけ離れた位置を基準に、さらに X だけ一方の面側へ離れた位置に入射する。第 3 光 1 9 0 4 は、屈折率分布スラブ導波路 1 9 0 1 の長さ方向に平行な一方の面から $2W/3$ (W はスラブ幅) だけ離れた位置を基準に、さらに X だけ他方の面側へ離れた位置に入射する。

以上の入射位置を持つ 3 個の信号光が、入射面から入射され前述の (数 1 2) を満足するスラブ長 L を有する屈折率分布スラブ導波路を伝送すると、第 1 光 1 9 0 2 と、第 2 光 1 9 0 3 と、第 3 光 1 9 0 4 とは、それぞれ屈折率分布スラブ導波路 1 9 0 1 の長さ方向に平行な他方の面から X だけ離れた位置と、屈折率分布スラブ導波路 1 9 0 1 の長さ方向に平行な一方の面から $W/3$ (W はスラブ幅) だけ離れた位置を基準に、さらに X だけ他方の面側へ離れた位置と、さらに X だけ一方の面側へ離れた位置との 3 箇所、に入射した際と同一のプロファイルを持つ 3 個の像を形成する。したがって、各信号光の像の位置に受光部を形成すると、各出射光を出力させることができる。

以上の例は、 $N = 3$ の場合であったが、 N が 3 以上の奇数の場合も、(数 1 2) を満足する屈折率分布スラブ導波路により、幅方向の中心に対して非対称の信号光の入力に対応して、幅方向の中心に対して非対称の出力を得るスターカプラを構成することができる。このように、 N が奇数の場合も MMI のセルフイメージング原理を用いて、ス

ターカプラを実現することができる。なお、上記（数 1 2）において、 p は整数であるので、 p を変化させることにより屈折率分布スラブ導波路のスラブ長 L を所望の長さに調整することができる。特に、長さを調整する必要がない場合は、 $p = 0$ とすることにより、最短の屈折率分布スラブ導波路を得ることができる。

（実施の形態 6）

図 8 A は、本発明の実施の形態 6 に係る光デバイスである片側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。実施の形態 6 に係る光デバイスは、光を伝送する第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b を中心に構成される。第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b は、図 8 A に示すように、共に xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b は、同一の幅方向の大きさを有する。第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b は、幅方向に連続して接続されて配置される。また、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b は、所定の熱光学効果を呈するポリマーからなる。

第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a は、入射面 8 0 1 に入射光 8 0 4 を入射させるための入射位置と、出射面 8 0 2 に出射光 8 0 9 を出射させるための出射位置と

を有する。入射位置と出射位置とは、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bを一つのスラブ導波路801としたときの幅方向の中心から離れた位置にあり、互いに幅方向の位置が同一である。第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bは、出射面802に出射光808を出射させるための出射位置を有する。第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bの出射位置は、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801aの出射位置に対して、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bを一つのスラブ導波路としたときの幅方向の中心に对称になる位置に配置される。また、第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bは、上面に冷熱シート805を有する。冷熱シート805は、接続線806により温度制御部807に接続される。

温度制御部807は、外部から供給される制御信号に基づいて冷熱シート805を温度制御する。冷熱シート805が温度制御されることにより、第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bの温度を変化するので、熱光学効果に基づいて屈折率の絶対値が変化する。実施の形態6の光デバイスは、温度制御部807がOFF状態のとき、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bの屈折率分布が一致するように構成されている。このとき、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bは、共に厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{max} を有

し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない分布を有する。またこのとき、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bは、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。そして、実施の形態6の光デバイスは、温度制御部807がON状態のとき、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801aの最大屈折率が、第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bの最大屈折率の絶対値より大きくなり、互いの屈折率分布全体が異なるように構成されている。

第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bは、スラブ長Lを、 $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する0次モード光の実効屈折率を n_0 とする。第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bのスラブ長Lは、実施の形態1で説明した(1)非対称入射の(数3)において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。なお、セルフイメージング原理によれば $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の長さ毎に同様の現象が現れるので、スラブ長Lを $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の奇数倍にすることにより、用途に応じて第1の屈折率分布スラブ部分導波路801a及び第2の屈折率分布スラブ部分導波路801bの長さを調節することができる。

次に、上記構造で光進路方向を変化させる光スイッチのメカニズムを説明する。温度制御部807がOFF状態の時、第1の屈折率分布スラブ部分導波路801aの入射位

置から入射した入射光 804 は、共に同一の屈折率分布を持つため第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b を一つのスラブ導波路として伝送される。したがって、実施の形態 1 で説明した (1) 非対称入射の (数 4) に従って、出射面 803 における幅方向の位置が入射位置に対して中心に对称になる出射位置に入射光と同じプロファイルの像を形成する。この像が出射光 808 として出射される。

一方、温度制御部 807 が ON 状態の時、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a の最大屈折率が、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b の最大屈折率より大きくなるので、所定の屈折率差を満足させることにより、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b は第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a に対してクラッドとして機能する。したがって、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a の入射位置から入射した入射光 804 は、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b の境界面での全反射により、出射面 803 まで第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a に閉じ込められる。この結果、出射光 808 は、出射面 803 から出射される。

以上のようにして、温度制御部 807 の ON-OFF スイッチング制御によって、入射光 804 の進行方向を変更することができる光スイッチを実現することができる。なお、実施の形態 6 の光デバイスは、温度制御部 807 が OFF 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 80

1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b の屈折率分布が一致するように構成されている例であったが、温度制御部 8 0 7 が O N 状態のとき、屈折率分布が一致するように構成してもよい。この場合は、温度制御部 8 0 7 が O F F 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a の最大屈折率が、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b の最大屈折率より低くなり、互いの屈折率分布が異なるように構成するとよい。ただし、この構成の場合を採用した場合、温度制御部 8 0 7 が O N 状態のとき、第 2 の屈折率分布スラブ導波路 8 0 1 b から出射光 8 0 8 が出射され、温度制御部 8 0 7 が O F F 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ導波路 8 0 1 a から出射光 8 0 9 が出射される。

図 8 B は、本発明の実施の形態 6 の変形例 1 に係る光デバイスである両側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。実施の形態 6 の変形例 1 は、先に説明した光デバイスと概略構成が同一であるので、異なる部分のみを説明する。なお、同一の符号は同一の構成であることを示している。

実施の形態 6 の変形例 1 において、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b は、冷熱シート 8 0 5 を有し、接続線 8 0 6 によって温度制御部 8 0 7 と接続されている。実施の形態 6 の変形例 1 の光デバイスは、温度制御部 8 0 7 が O F F 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b の屈折率分布が一致するように構成されている。そして

、温度制御部 807 が ON 状態のとき、双方の温度を逆相で制御して、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a の最大屈折率を大きくし、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b の最大屈折率を小さくして、互いの屈折率分布が異なるように構成している。このように、構成することにより、片側制御型よりも高速にスイッチングすることができる。なお、実施の形態 6 の変形例 1 において、温度制御部 807 が ON 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b の屈折率分布が一致するように構成してもよい。この場合、温度制御部 807 が OFF 状態のとき、双方の温度を逆相で制御して、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a の最大屈折率を大きくし、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b の最大屈折率を小さくして、互いの屈折率分布が異なるように構成するとよい。

図 20A は、本発明の実施の形態 6 の変形例 2 に係る光デバイスである片側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。実施の形態 6 の変形例 2 は、先に説明した実施の形態 6 の光デバイスと概略構成が同一であるので、異なる部分のみを説明する。なお、同一の符号は同一の構成であることを示している。

実施の形態 6 の変形例 2 において、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 a の幅方向の大きさは、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 a と第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 b を一つの光導波路としたときの $1/\sqrt{2}$ 倍である。また、実施の形態 6 の変形例 2 にお

いて、温度制御部 807 が ON 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 a の最大屈折率が、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 801 b の最大屈折率より大きくなり、互いの屈折率分布全体が異なるように構成されている。このように構成することにより、温度制御部 807 が ON 状態の場合、実施の形態 6 の変形例 2 に係る第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 a は、幅方向の大きさが $1/\sqrt{2}W$ である屈折率分布スラブ導波路として機能し、基本モードの大きさも $1/\sqrt{2}W_0$ となる。第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 a のスラブ長 L が、ほぼ $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致している場合は、出射光 809 が出射面 2003 において入射位置と幅方向の位置が同一である出射位置に入射光 804 と同一のプロファイルを持つ像を形成する条件を満足する。このため、実施の形態 6 の変形例 2 に係る光デバイスは、温度制御部 807 が ON 状態の場合にもマルチモード干渉のセルフイメージング原理により入射光と同一のプロファイルをもつ出射光を生成することができる。

なお、実施の形態 6 の変形例 2 に係る光デバイスは、温度制御部 807 が OFF 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 a 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 2001 b の屈折率分布が一致するように構成されている例であったが、温度制御部 807 が ON 状態のとき、屈折率分布が一致するように構成してもよいことはいうまでもない。ただし、この構成の場合を採用した場合、温度制御部 807 が ON 状態のとき、第 2 の屈折率分布ス

ラブ導波路 2 0 0 1 b から出射光 8 0 8 が出射され、温度制御部 8 0 7 が O F F 状態のとき、第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2 0 0 1 a から出射光 8 0 9 が出射される。

図 2 0 B は、本発明の実施の形態 6 の変形例 3 に係る光デバイスである両側制御型光スイッチの概要を示す斜視図である。実施の形態 6 の変形例 2 は、先に説明した実施の形態 6 の変形例 1 と変形例 2 とを組み合わせた光デバイスである。なお、同一の符号は同一の構成であることを示している。

実施の形態 6 の変形例 3 に係る光デバイスは、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2 0 0 1 a の幅方向の大きさは、第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 2 0 0 1 a と第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 2 0 0 1 b を一つの光導波路としたときの $1/\sqrt{2}$ 倍であり、第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 2 0 0 1 b も接続線 8 0 6 によって温度制御部 8 0 7 と接続されている。この構成により、温度制御部 8 0 7 からの信号に基づく O N - O F F スイッチング制御を高速に行うことができ、O N 状態及び O F F 状態のいずれの状態においてもマルチモード干渉のセルフイメージング原理によって生成された出射光を得ることができる。

なお、実施の形態 6 のすべての説明において、熱光学効果の大きなポリマーを使用して屈折率制御を行う例示したが、電気光学効果など、第 1 及び第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路のそれぞれの屈折率を個別に変化させる方法であれば何でも良い。

(実施の形態 7)

図 9 は、本発明の実施の形態 7 に係る光集積デバイスである光スイッチアレイの概要を示す斜視図である。実施の形態 7 の光スイッチアレイは、実施の形態 6 の変形例 1 に記載した光スイッチ（図 8 B）を屈折率分布スラブ導波路 8 0 1 の厚さ方向に 8 個積層した積層光スイッチ群 9 0 1 を備える。積層光スイッチ群 9 0 1 に含まれる各光スイッチにおいて、実施の形態 6 において説明した第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a に相当する部分が図中下側に配置されている。実施の形態 7 に係る光集積デバイスは、第 1 アレイ O / E 変換部 9 0 5 と、第 2 アレイ O / E 変換部 9 0 6 と、第 1 出力電気線（バス） 9 0 7 と、第 2 出力電気線（バス） 9 0 8 とを含む。

第 1 アレイ O / E 変換部 9 0 5 は、各光スイッチの第 1 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 a に相当する出射部に対向して設けられた 8 個の受光部からなる第 1 受光部群 9 0 3 を有する。また、第 1 アレイ O / E 変換部 9 0 5 は、第 1 出力信号線 9 0 8 に接続されている。第 2 アレイ O / E 変換部 9 0 6 は、各光スイッチの第 2 の屈折率分布スラブ部分導波路 8 0 1 b に相当する出射部に対向して設けられた 8 個の受光部からなる第 2 受光部群 9 0 4 を有する。また、第 2 アレイ O / E 変換部 9 0 6 は、第 2 出力信号線 9 0 8 に接続されている。ここでは、温度制御部が ON 状態のとき第 1 の屈折率分布部分導波路側から出射光が出射し、温度制御部が ON 状態のとき第 1 の屈折率分布部分導波路側から出射光が出射するように構成されている。

以上の構成において、積層光スイッチ 9 0 1 に含まれる

各光スイッチの第1の屈折率分布スラブ部分導波路に相当する部分（図中下側）にアレイ入射光902を入射させ、長さ方向に伝送させる。各光スイッチは、それぞれ独立に実施の形態6で説明した温度制御部の制御に基づいてスイッチングを行う。温度制御部がON状態のとき、各光スイッチからの出射光は、第1アレイO/E変換部905の第1受光部群903に含まれる受光部へ入射する。また、温度制御部がOFF状態のとき、各光スイッチからの出射光は、第2アレイO/E変換部906の第2受光部群904に含まれる受光部へ入射する。

第1アレイO/E変換部905及び第2アレイO/E変換部906は、各受光部へ出射光が出射された場合は1信号を、各受光部へ出射光が出射されなかった場合は0信号をそれぞれ割り当てる。第1アレイO/E変換部905において割り当てられた信号は、出力信号として第1出力電気線907により外部へ出力される。第2アレイO/E変換部906において割り当てられた信号は、出力信号として第2出力電気線908により外部へ出力される。このように、信号を割り当てることにより、8桁のデジタル信号とその反転信号を平行に伝送することができる。

なお、アレイ入射光902は、アレイ型の発光素子から放射した光を直接入射させても、光ファイバ等の入射側に配置された光伝送路により外部光源からの光を入射させてもよい。また、例えば、実施の形態2に示した光8分岐の光デバイスによりアレイ入射光を生成する構成でもよい。また、積層光スイッチの各スイッチ間に空気などの断熱材

料や絶縁体を設けてもよい。

(実施の形態 8)

図 10 は、本発明の実施の形態 8 に係る光デバイスである 1 対双方向ストレートシートバスの概略構成を示す斜視図である。実施の形態 8 に係る光デバイスは、実施の形態 3 において説明した 2 信号ストレートシートバスの一方の信号光の伝送方向を逆転させ、双方向通信を可能にしたものである。実施の形態 8 に係る光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路 1000 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 1001 は、図 10 に示すように、 xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 1001 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 1001 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。実施の形態 8 に係る光デバイスは、第 1 E/O 変換部 1006 と、第 2 E/O 変換部 1009 と、第 1 O/E 変換部 1007 と、第 2 O/E 変換部 1008 と、第 1 入力電気線（バス）1010 と、第 2 入力電気線（バス）1011 と、第 1 出力電気線（バス）1012 と、第 2 出力電気線（バス）1013 とを備える。

第 1 E/O 変換部 1006 は、第 1 の発光部 1014 を含む。第 2 E/O 変換部 1009 は、第 2 の発光部 1015 を含む。第 1 の発光部 1014 は、屈折率分布スラブ導波路 1001 の第 1 面 1002 において幅方向の任意の位置に第 2 光 1019（波長： λ ）を入射させる。第 2 の発

光部 1 0 1 5 は、屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 の第 2 面 1 0 0 3 において幅方向の任意の位置に、第 2 光 1 0 1 9 と同一波長の第 1 光 1 0 1 8 を入射させる。第 1 E / O 変換部 1 0 0 6 は、第 1 入力電気線（バス） 1 0 1 0 と接続される。第 1 E / O 変換部 1 0 0 6 は、第 1 入力電気線（バス） 1 0 1 0 から入力される外部電気信号を第 1 の発光部 1 0 1 4 から放射される信号光に変換する。第 2 E / O 変換部 1 0 0 9 は、第 2 入力電気線（バス） 1 0 1 1 と接続される。第 2 E / O 変換部 1 0 0 9 は、第 2 入力電気線（バス） 1 0 1 1 から入力される外部電気信号を第 2 の発光部 1 0 1 5 から放射される信号光に変換する。

第 1 O / E 変換部 1 0 0 7 は、第 1 の受光部 1 0 1 6 を含む。第 2 O / E 変換部 1 0 0 8 は、第 2 の受光部 1 0 1 7 を含む。第 1 の受光部 1 0 1 6 は、屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 の第 1 面 1 0 0 2 において第 2 の発光部 1 0 1 5 と幅方向の位置が同一になる位置に配置され、第 2 光 1 0 1 9（波長： λ ）を受光する。第 2 の受光部 1 0 1 7 は、屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 の第 2 面 1 0 0 3 において第 1 の発光部 1 0 1 4 と幅方向の位置が同一になる位置に、第 2 光 1 0 1 9 と同一波長の第 1 光 1 0 1 8 を受光する。第 1 O / E 変換部 1 0 0 7 は、第 1 出力電気線（バス） 1 0 1 2 と接続される。第 1 O / E 変換部 1 0 0 7 は、受光した信号光を第 1 出力電気線（バス） 1 0 1 0 により外部へ出力する外部電気信号に変換する。第 2 O / E 変換部 1 0 0 8 は、第 2 出力電気線（バス） 1 0 1 3 と接続される。第 2 O / E 変換部 1 0 0 8 は、受光した信号光

を第2出力電気線（バス）1013により外部へ出力する外部電気信号に変換する。

屈折率分布スラブ導波路1001は、スラブ長 L を、ほぼ $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する0次モード光の実効屈折率を n_0 とする。屈折率分布スラブ導波路1001のスラブ長 L は、実施の形態1で説明した（1）非対称入射の（数2）において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。スラブ長 L をこのように設定することにより、第1の発光部1014から入射した第1光1018は、第2の受光部1017付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。同様に、第2の発光部1015から入射した第2光1019は、第1の受光部1016付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。なお、セルフイメージング原理によれば $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の長さ毎に同様の現象が現れるので、スラブ長 L を $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の整数倍にすることにより、用途に応じて屈折率分布スラブ導波路1001の長さを調節することができる。なお、詳細な分岐のメカニズムおよび、高速伝送であっても厚さ方向と幅方向で信号光波形の乱れが無いメカニズムは、実施の形態1と同様である。

以上の構成により、第1入力電気線1010から外部電気信号が第1E/O変換部1006に入力されると、第1E/O変換部1006は、外部電気信号を第1の発光部1014から放射される第1光1018に変換する。また、第2入力電気線1011から外部信号が第2E/O変換部

1 0 0 9 へ入力されると、第 2 E / O 変換部 1 0 0 9 は、外部電気信号を第 2 の発光部 1 0 1 5 から放射される第 2 光 1 0 1 9 に変換する。

第 1 の発光部 1 0 1 4 から放射された第 1 光 1 0 1 8 は、第 1 面 1 0 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 に入射して伝送される。第 1 光 1 0 1 8 は、セルフイメージング原理に従って、第 2 の受光部 1 0 1 7 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第 1 光 1 0 1 4 は、第 2 面 1 0 0 3 から第 2 の受光部 1 0 1 7 へ出力される。第 2 の受光部 1 0 1 7 は、受光した第 1 光 1 0 1 8 に応じた電気信号を出力する。出力された電気信号は、第 2 出力電気線 1 0 1 3 から外部へ出力される。一方、第 2 の発光部 1 0 1 5 から放射された第 2 光 1 0 1 9 は、第 2 面 1 0 0 3 から屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 に入射して伝送される。第 2 光 1 0 1 9 は、セルフイメージング原理に従って、第 1 の受光部 1 0 1 6 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第 2 光 1 0 1 9 は、第 1 面 1 0 0 2 から第 1 の受光部 1 0 1 6 へ出力される。第 1 の受光部 1 0 1 6 は、受光した第 2 光 1 0 1 9 に応じた電気信号を出力する。第 1 の受光部 1 0 1 6 は、受光した第 2 光 1 0 1 9 に応じた電気信号を出力する。出力された電気信号は、第 1 出力電気線 1 0 1 2 から外部へ出力される。このように、MMI は光の伝送方向に関係なく可逆であるため MMI を双方向に利用することができる。したがって、2 個の信号光を双方向にストレートに伝送するのに個別の光導波路を用意す

る必要が無く、1個の屈折率分布スラブ導波路1001で独立して双方向に伝送することができる。

図11は、本発明の実施の形態8の変形例に係る光デバイスである4対双方向ストレートシートの概要を示す斜視図である。変形例の光デバイスは、前述した1対双方向信号ストレートシートバスと概略構成を同じくする。変形例の光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路1101と、第1アレイE/O変換部1106と、第2アレイE/O変換部1109と、第1アレイO/E変換部1107と、第2アレイO/E変換部1108と、第1入力電気線（バス）1010と、第2入力電気線（バス）1011と、第1出力電気線（バス）1012と、第2出力電気線（バス）1013とを備える。

第1アレイE/O変換部1106は、1対双方向ストレートシートの第1E/O変換部1006と概略同一の構成を有するが、第1の発光部1014の代わりに4個の発光部からなる第1の発光部群1114が形成されている点で相違する。第2アレイE/O変換部1109は、1対双方向ストレートシートの第2E/O変換部1009と概略同一の構成を有するが、第2の発光部1015の代わりに4個の発光部からなる第2の発光部群1115が形成されている点で相違する。第1アレイO/E変換部1107は、1対双方向ストレートシートの第1O/E変換部1007と概略同一の構成を有するが、第1の受光部1016の代わりに4個の受光部からなる第1の受光部群1116が形成されている点で相違する。第2アレイO/E

E 変換部 1 1 0 8 は、1 対双方向ストレートシートの第 2 O / E 変換部 1 0 0 8 と概略同一の構成を有するが、第 2 の受光部 1 0 1 7 の代わりに 4 個の受光部からなる第 2 の受光部群 1 1 1 7 が形成されている点で相違する。第 1 の発光部群 1 1 1 4 に含まれる発光部は、すべて第 2 の受光部群 1 1 1 7 に含まれる受光部と幅方向の位置が対応している。第 2 の発光部群 1 1 1 5 に含まれる発光部は、すべて第 1 の受光部群 1 1 1 6 に含まれる受光部と幅方向の位置が対応している。

第 1 発光部群 1 1 1 4 は、第 1 入力電気線 1 0 1 0 から入力された外部電気信号に基づいて、すべて同一波長の 4 個の信号光である第 1 光 1 1 2 1 ~ 第 4 光 1 1 2 4 を、第 1 面 1 1 0 2 からそれぞれ独立に屈折率分布スラブ導波路 1 1 2 1 へ入射させる。屈折率分布スラブ導波路 1 1 0 1 は、第 1 光 1 1 2 1 ~ 第 4 光 1 1 2 4 を伝送する。第 1 光 1 1 2 1 ~ 第 4 光 1 1 2 4 は、屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 の場合と同様に、第 2 面 1 1 0 3 から出射され、第 2 受光部群 1 1 1 7 の内の幅方向の位置が同一である受光部に受光される。受光された信号は、第 2 出力電気線 1 0 1 3 により外部へ出力される。

第 2 発光部群 1 1 1 5 は、第 2 入力電気線 1 0 1 1 から入力された外部電気信号に基づいて、すべて同一波長の 4 個の信号光である第 5 光 1 1 2 5 ~ 第 8 光 1 1 2 8 を、第 2 面 1 1 0 3 からそれぞれ独立に屈折率分布スラブ導波路 1 1 0 1 へ入射させる。屈折率分布スラブ導波路 1 1 0 1 は、第 5 光 1 1 2 5 ~ 第 8 光 1 1 2 8 を伝送する。第 5 光

1 1 2 5 ～ 第 8 光 1 1 2 8 は、屈折率分布スラブ導波路 1 0 0 1 の場合と同様に、第 1 面 1 1 0 2 から出射され、第 1 受光部群 1 1 1 6 の内の幅方向の位置が同一である受光部に受光される。受光された信号は、第 1 出力電気線 1 0 1 1 により外部へ出力される。

4 個の入射光が独立してそれぞれの幅方向の平行位置に現れる原理は、実施の形態 1 で説明した (1) 非対称入射の (数 2) において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。このように、MMI を利用することで、4 対の信号光を双方向にストレートに伝送するのに個別の光導波路を用意する必要が無く、1 個の屈折率分布スラブ導波路 1 1 0 1 で独立して伝送することができる。

実施の形態 8 は 1 対双方向ストレートシートバス及び 4 対双方向ストレートシートバスの例を示したが、一般に $N \times M$ 信号ストレートシートバス ($N, M = 1, 2, 3 \dots$) についても同様に設計することが可能である。この場合、ほぼ以下の式の整数倍の値であるスラブ長 L を持つ屈折率分布スラブ導波路において、第 1 面の任意の位置に N 個、第 2 面の任意の位置から M 個の入射光をそれぞれ入射させることにより、第 2 面の幅方向の位置が同一の位置から N 個、第 1 面の幅方向の位置が同一の位置から M 個の出射光を得ることができる。

$$\frac{8n_0W_0^2}{\lambda}$$

(実施の形態 9)

図 1 2 は、本発明の実施の形態 9 に係る光デバイスであ

る 1 対双方向クロスシートバスの概略構成を示す斜視図である。実施の形態 9 に係る光デバイスは、実施の形態 4 において説明した 2 信号クロスシートバスの一方の信号光の伝送方向を逆転させ、双方向通信を可能にしたものである。実施の形態 9 に係る光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路 1201 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 1201 は、図 12 に示すように、 xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 1201 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 1201 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。実施の形態 9 に係る光デバイスは、第 1 E/O 変換部 1206 と、第 2 E/O 変換部 1209 と、第 1 O/E 変換部 1207 と、第 2 O/E 変換部 1208 と、第 1 入力電気線（バス）1010 と、第 2 入力電気線（バス）1011 と、第 1 出力電気線（バス）1012 と、第 2 出力電気線（バス）1013 とを備える。

第 1 E/O 変換部 1206 は、第 1 の発光部 1214 を含む。第 2 E/O 変換部 1209 は、第 2 の発光部 1215 を含む。第 1 の発光部 1214 は、屈折率分布スラブ導波路 1201 の第 1 面 1202 において幅方向の任意の位置に第 1 光 1218（波長： λ ）を入射させる。第 2 の発光部 1215 は、屈折率分布スラブ導波路 1201 の第 2 面 1203 において幅方向の任意の位置に、第 1 光 1218 と同一波長の第 2 光 1219 を入射させる。第 1 E/O

変換部 1 2 0 6 は、第 1 入力電気線（バス） 1 0 1 0 と接続される。第 1 E / O 変換部 1 2 0 6 は、第 1 入力電気線（バス） 1 0 1 0 から入力される外部電気信号を第 1 の発光部 1 2 1 4 から放射される信号光に変換する。第 2 E / O 変換部 1 2 0 9 は、第 2 入力電気線（バス） 1 0 1 3 と接続される。第 2 E / O 変換部 1 2 0 9 は、第 2 入力電気線（バス） 1 0 1 3 から入力される外部電気信号を第 2 の発光部 1 2 1 5 から放射される信号光に変換する。

第 1 O / E 変換部 1 2 0 7 は、第 1 の受光部 1 2 1 6 を含む。第 2 O / E 変換部 1 2 0 8 は、第 2 の受光部 1 2 1 7 を含む。第 1 の受光部 1 2 1 6 は、屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 の第 1 面 1 2 0 2 において第 2 の発光部 1 2 1 5 と幅方向の位置が中心に対称になる位置に配置され、第 2 光 1 2 1 9（波長： λ ）を受光する。第 2 の受光部 1 2 1 7 は、屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 の第 2 面 1 2 0 3 において第 1 の発光部 1 2 1 4 と幅方向の位置が中心に対称になる位置に、第 2 光 1 2 1 9 と同一波長の第 1 光 1 2 1 8 を受光する。第 1 O / E 変換部 1 2 0 7 は、第 1 出力電気線（バス） 1 0 1 2 と接続される。第 1 O / E 変換部 1 2 0 7 は、受光した信号光を第 1 出力電気線（バス） 1 0 1 2 により外部へ出力する外部電気信号に変換する。第 2 O / E 変換部 1 2 0 8 は、第 2 出力電気線（バス） 1 0 1 1 と接続される。第 2 O / E 変換部 1 2 0 8 は、受光した信号光を第 2 出力電気線（バス） 1 0 1 1 により外部へ出力する外部電気信号に変換する。

屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 は、スラブ長 L を、ほ

ば $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ に一致させている。ただし、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率を n_0 とする。屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 のスラブ長 L は、実施の形態 1 で説明した (1) 非対称入射の (数 3) において、入射光を複数にして重ね合わせた場合に相当する。スラブ長 L をこのように設定することにより、第 1 の発光部 1 2 1 4 から入射した第 1 光 1 2 1 8 は、第 2 の受光部 1 2 1 7 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。同様に、第 2 の発光部 1 2 1 5 から入射した第 2 光 1 2 1 9 は、第 1 の受光部 1 2 1 6 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。なお、セルフイメージング原理によれば $8 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の長さ毎に同様の現象が現れるので、スラブ長 L を $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ の奇数倍にすることにより、用途に応じて屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 の長さを調節することができる。なお、詳細な分岐のメカニズムおよび、高速伝送であっても厚さ方向と幅方向で信号光波形の乱れが無いメカニズムは、実施の形態 1 と同様である。

以上の構成により、第 1 入力電気線 1 0 1 0 から外部電気信号が第 1 E / O 変換部 1 2 0 6 に入力されると、第 1 E / O 変換部 1 2 0 6 は、外部電気信号を第 1 の発光部 1 2 1 4 から放射される第 1 光 1 2 1 8 に変換する。また、第 2 入力電気線 1 0 1 3 から外部信号が第 2 E / O 変換部 1 2 0 9 へ入力されると、第 2 E / O 変換部 1 2 0 9 は、外部電気信号を第 2 の発光部 1 2 1 5 から放射される第 2 光 1 2 1 9 に変換する。

第 1 の発光部 1 2 1 4 から放射された第 1 光 1 2 1 8 は、第 1 面 1 2 0 2 から屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 に入射して伝送される。第 1 光 1 2 1 8 は、セルフイメージング原理に従って、第 2 の受光部 1 2 1 7 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第 1 光 1 2 1 8 は、第 2 面 1 2 0 3 から第 2 の受光部 1 2 1 7 へ出力され、第 2 出力電気線 1 0 1 1 から外部へ出力される。一方、第 2 の発光部 1 2 1 5 から放射された第 2 光 1 2 1 9 は、第 2 面 1 2 0 3 から屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 に入射して伝送される。第 2 光 1 2 1 9 は、セルフイメージング原理に従って、第 1 の受光部 1 2 1 6 付近に入射した際と同じプロファイルを持つ像を形成する。これにより、第 2 光 1 2 1 9 は、第 1 面 1 2 0 2 から第 1 の受光部 1 2 1 6 へ出力される。第 1 受光部 1 2 1 6 は、受光した第 2 光 1 2 1 9 に応じた電気信号を出力する。第 1 の受光部 1 2 1 6 は、受光した第 2 光 1 2 1 9 に応じた電気信号を出力する。出力された電気信号は、第 1 出力電気線 1 0 1 2 から外部へ出力される。このように、MMI は光の伝送方向に関係なく可逆であるため MMI を双方向に利用することができる。したがって、2 個の信号光を双方向にクロスに伝送するのに個別の光導波路を用意する必要が無く、1 個の屈折率分布スラブ導波路 1 2 0 1 で独立して双方向に伝送することができる。

実施の形態 9 は 1 対双方向ストレートシートバスの例を示したが、一般に $N \times M$ 信号クロスシートバス ($N, M = 1, 2, 3 \dots$) についても同様に設計することが可能

である。この場合、ほぼ以下の式の奇数倍の値であるスラブ長 L を持つ屈折率分布スラブ導波路において、第 1 面の任意の位置に N 個、第 2 面の任意の位置から M 個の入射光をそれぞれ入射させることにより、第 2 面の幅方向の中心に対称な位置から N 個、第 1 面の幅方向の中心に対称な位置から M 個の出射光を得ることができる。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

(実施の形態 10)

図 13 は、本発明の実施の形態 10 に係る光集積デバイスである 1 対双方向ストレートシートバスアレイの構成概要図である。実施の形態 10 の光集積デバイスは、図 13 に示すように実施の形態 8 の 1 対双方向ストレートシートバスを、厚さ方向に 8 個積層して形成される積層双方向ストレートシートバス 1301 を中心に構成される。実施の形態 10 に係る光集積デバイスは、積層双方向ストレートシートバス 1301 と、第 1 アレイ E/O 変換部 1302 と、第 1 アレイ O/E 変換部 1303 と、第 2 アレイ E/O 変換部 1305 と、第 2 アレイ O/E 変換部 1304 と第 1 入力電気線（バス）1306 と、第 2 入力電気線（バス）1308 と、第 1 出力電気線（バス）1307 と、第 2 出力電気線（バス）1309 とを備える。

第 1 アレイ E/O 変換部 1302 は、各双方向ストレートシートバスの一方端面（紙面左側）に配置される 8 個の発光部をアレイ化したものである。第 1 アレイ O/E 変換部 1303 は、各双方向ストレートシートバスの一方端面

(紙面左側) に配置される 8 個の受光部をアレイ化したものである。第 1 アレイ E / O 変換部 1 3 0 2 及び第 1 アレイ O / E 変換部 1 3 0 3 は、隣接して配置される。第 2 アレイ E / O 変換部 1 3 0 5 は、各双方向ストレートシートバスの他方端面 (紙面右側) に配置される 8 個の発光部をアレイ化したものである。第 2 アレイ O / E 変換部 1 3 0 4 は、各双方向ストレートシートバスの一方端面 (紙右左側) に配置される 8 個の受光部をアレイ化したものである。第 2 アレイ E / O 変換部 1 3 0 5 及び第 2 アレイ O / E 変換部 1 3 0 4 は、隣接して配置される。第 1 アレイ E / O 変換部 1 3 0 2 の各発光部は、第 2 アレイ O / E 変換部 1 3 0 4 の各受光部と、各双方向ストレートシートバスを挟んで対向して配置される。第 2 アレイ E / O 変換部 1 3 0 5 の各発光部は、第 1 アレイ O / E 変換部 1 3 0 3 の各受光部と、各双方向ストレートシートバスを挟んで対向して配置される。第 1 アレイ E / O 変換部 1 3 0 2 は、第 1 入力電気線 1 3 0 6 に接続される。第 2 アレイ E / O 変換部 1 3 0 5 は、第 2 入力電気線 1 3 0 8 に接続される。第 1 アレイ O / E 変換部 1 3 0 3 は、第 1 出力電気線 1 3 0 7 に接続される。第 2 アレイ O / E 変換部 1 3 0 4 は、第 2 出力電気線 1 3 0 9 に接続される。

以上の構成において、第 1 入力電気線 1 3 0 6 から入力された電気信号は、第 1 アレイ E / O 変換部 1 3 0 2 により信号光に変換される。変換された各信号光は、各発光部より放射され入射光として各各双方向ストレートシートバスに入射する。一方、第 2 入力電気線 1 3 0 8 から入力さ

れた電気信号は、第2アレイE/O変換部1305により信号光に変換される。変換された各信号光は、各発光部より放射され入射光として各各双方向ストレートシートバスに入射する。信号光は、それぞれ伝送されセルフイメージング原理に従って、入射光と同一のプロファイルを持つ像を各受光部の近傍に形成する。像は、双方向ストレートシートバスの各受光部へ出射される。出射光を各受光部で受光した第1アレイO/E変換部1303は、出射光を電気信号に変換して第1出力電気線1307へ出力する。出射光を各受光部で受光した第2アレイO/E変換部1304は、出射光を電気信号に変換して第2出力電気線1309へ出力する。このようにして、簡単な構成により双方向ストレートシートバスが、実現する。

なお、実施の形態10は、すべてが1対双方向ストレートシートバスからなる積層双方向ストレートシートバスを開示したが、これに限られない。例えば、実施の形態9の1対双方向クロスシートバスを積層してもよい。また、実施の形態8に係る1対ストレートシートバスと、実施の形態9に係る1対双方向クロスシートバスとの2種類を積層した双方向光バスアレイにしてもよく、実施の形態8及び実施の形態9に係る双方向シートバスと、実施の形態3及び実施の形態4に係る光シートバスの内から複数の種類の光バスを積層した複合光バスアレイにしてもよい。

(実施の形態11)

図14は、本発明の実施の形態11に係る光集積デバイスである多層光バスの構成概要図である。実施の形態11

に係る光集積デバイスは、長さ方向の大きさが異なる屈折率分布スラブ導波路が厚さ方向に積層され形成されている。積層される屈折率分布スラブ導波路は、実施の形態1乃至5、8、9など単層の屈折率分布スラブ導波路のいずれを用いてもよい。マルチモード干渉のセルフイメージング原理に従うと、所定の周期ごとに同様の効果が現れるので、同種類の光デバイスであっても異なる長さの屈折率分布スラブ導波路を用いることができる。例えば、図14に記載された光集積デバイスは、屈折率分布スラブ導波路を用いたストレートシートバスが積層されている。光集積デバイスは、入射面が揃えられており、長さ方向の大きさが、上から順に、第1の屈折率分布スラブ導波路1401について $L_1 = 8 \ n_0 \cdot W_0^2 / \lambda$ と、第2の屈折率分布スラブ導波路1402について $L_2 = 16 \ n_0 \cdot W_0^2 / \lambda$ と、第3の屈折率分布スラブ導波路1403について $L_3 = 32 \ n_0 \cdot W_0^2 / \lambda$ としている。このように構成することにより、異なる長さ方向の大きさを持つ各屈折率分布スラブ導波路からの出射光のプロファイルを同一にすることができる。

実際の機器間や基板間あるいは基板上に実装されるチップ間の間隔は、一定でない、したがって、実際には各種長さに対応した光シートバスが必要である。実施の形態11のように、異なる長さの光シートバスを多層化して一体化することで、基板から距離の異なる複数の基板へ光伝送することが可能となる。このとき、基板には多層光バスの端面の揃った端面140を接続し、端面の揃った側への入出

力には例えば実施の形態 1 に係るの光 N 分岐器（結合器）を使用してもよい。

（実施の形態 1 2）

図 2 1 A は、本発明の実施の形態 1 2 に係る光分波を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の概要を示す斜視図である。図 2 1 B は、本発明の実施の形態 1 2 に係る光分波を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の断面図である。図 2 2 A は、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 に $1.30\ \mu\text{m}$ の信号光を伝送させた場合の BPM（Beam Propagation Method）シミュレーション結果である。図 2 2 B は、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 に $1.55\ \mu\text{m}$ の信号光を伝送させた場合の BPM シミュレーション結果である。

実施の形態 1 2 に係る光デバイスは、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 は、図 2 1 A に示すように、 xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 は、厚さ方向の中心位置に最大屈折率 n_{max} を持ち、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない厚さ方向の屈折率分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 は、入射面 2 1 0 2 と、出射面 2 1 0 3 とを含む。

入射面 2 1 0 2 は、幅方向の中心から所定距離離れた位置に異なる 2 つの波長（波長 $1.30\ \mu\text{m}$ と波長 1.55

μm) の光が多重された多重入射光 2 1 0 7 を入射させる入射部 (図示せず) に対向する。出射面 2 1 0 3 は、幅方向の中心に対して対称な位置から出射する互いに異なる波長を持つ 2 個の出射光 2 1 0 8 及び出射光 2 1 0 9 を受光する出射部 (図示せず) に対向する。入射部は、多重入射光 2 1 0 7 を入射面 2 1 0 2 の幅方向の中心から所定距離だけ離れた位置に入射させる。多重入射光 2 1 0 7 は、屈折率分布スラブ導波路 1 0 1 の内部を伝送される。多重入射光 2 1 0 7 は、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の内部で、後述するマルチモード干渉のセルフイメージング原理に従って波長に応じて 2 分波され、出射面 2 1 0 3 の幅方向に離れた位置から互いに異なる波長 (波長 $1.30\mu\text{m}$ と波長 $1.55\mu\text{m}$) を持つ 2 個の出射光 2 1 0 8 及び出射光 2 1 0 9 として出射し出射部に至る。屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 のスラブ長 L は、波長 $1.30\mu\text{m}$ の光量移動と波長 $1.55\mu\text{m}$ の光量移動との位相差が逆相 (すなわち、 π の整数倍) になる光路長である。

屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の厚さ方向の屈折率分布は、例えば、前述した (数 1) に示すように厚さ方向の中心に位置する屈折率の極大点 n_{max} と極大点から厚さ方向に離れる距離 r と屈折率分布定数 $A^{1/2}$ とで表される。

屈折率分布定数は、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 中を伝送する光が、膜厚から外へ出ないように、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の膜厚と多重入射光 2 1 0 7 のプロファイルとに応じて最適化される。例えば、屈折率分布ス

ラブ導波路 2 1 0 1 の膜厚に対して、多重入射光 2 1 0 7 の広がり角度が大きい場合は、屈折率分布定数を大きくする。逆に、多重入射光 2 1 0 7 の広がり角度が小さい場合は、屈折率分布定数を小さくする。また、多重入射光 2 1 0 7 のビーム径に合わせて屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の膜厚を調整すると結合ロスを低減できる。なお、屈折率分布は（数 1）に示すような連続的な変化でなくてもよく、中心からの距離の関数として階段状に変化しても問題無い。

次に、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の入射面 2 1 0 2 に幅方向の中心から所定距離離れた位置に入射する多重入射光 2 1 0 7 を入射した時に、出射面 2 1 0 3 側で幅方向の中心線に対称に波長に応じて 2 分波するメカニズムを説明する。ただし、（i）厚さ方向の中心面内を伝送する光の場合（図 2 1 B において A と記載した光路を伝送する信号光）と、（i i）厚さ方向の中心面内を伝送しない光とに分けて説明する。（i i）の厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、中心面に軸ずれ角度を有して入射する入射光の場合（図 2 1 B において B と記載した光路を伝送する信号光）と、中心面から位置ずれ（軸ずれ）した位置に入射する入射光の場合（図 2 1 B において C と記載した光路を伝送する信号光）との 2 つの信号光が存在する。（i）厚さ方向の中心面内を伝送する光は、厚さ方向の屈折率分布の影響を受けない。一方、（i i）厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、厚さ方向の屈折率分布の影響を受ける。

屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 において、(i) 厚さ方向の中心面内を伝送する光の振る舞いは、実質的に実効屈折率 n_0 しか感じないので、文献 (1 1) に記載されたスラブ導波路において一定屈折率を、屈折率 n_0 とした場合と等価である。したがって、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の厚さ方向の中心面内を伝送する多重入射光 2 1 0 7 に対する出射光の状態は、屈折率が n_0 で一定のスラブ導波路の幅方向に励起するマルチモードのモード分散によって、スラブ長 L に応じて変化する。ただし、出射光の状態が変化するのは、入射光と同じ像の数と出射位置とが変化することを意味する。実施の形態 1 2 に係る屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 の場合、スラブ長 L を、波長 $1.30\ \mu\text{m}$ の光量移動と波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の光量移動との位相差が逆相（すなわち、 π の整数倍）になる光路長にすることにより、出射面 2 1 0 3 に異なる波長を持つ多重入射光 2 1 0 7 と同じ 2 つの像が、幅方向の中心に対称に形成されよう構成している。

図 2 2 A の B P M シミュレーションは、波長 $1.30\ \mu\text{m}$ の光の振る舞いを示す。多重入射光 2 1 0 7 の内、波長 $1.30\ \mu\text{m}$ に対応する信号光成分は、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 に固有の第 0 次モード（基本モード）と、第 1 次モードとに展開される。第 0 次モードと第 1 次モードとはモード分散が異なる。言い換えると、第 0 次モードの伝搬定数と、第 1 次モードの伝搬定数とは互いに異なる。したがって、第 0 次モードと第 1 次モードとの間でモード干渉が生じる。このモード干渉によって、波長 1.30

μm に対応する信号光成分は、図 2 2 A に示すように、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 内を幅方向に交互に移動しながら長さ方向の一方の方向（紙面、左から右へ向けた方向）に伝送される。

一方、図 2 2 B の B P M シミュレーションは、波長 1 . 5 5 μm の光の振る舞いを示す。多重入射光 2 1 0 7 の内、波長 1 . 5 5 μm に対応する信号光成分も、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 に固有の第 0 次モード（基本モード）と、第 1 次モードとに展開される。このため、波長 1 . 3 0 μm の信号光成分の場合と同様に、第 0 次モードと第 1 次モードとの間でモード干渉が生じる。このモード干渉によって、波長 1 . 5 5 μm に対応する信号光成分は、図 2 2 B に示すように、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 内を幅方向に交互に移動しながら長さ方向の一方の方向（紙面、左から右へ向けた方向）に伝送される。

波長 1 . 3 0 μm の信号光成分は、波長 1 . 5 5 μm の信号光成分と波長分散が異なる。すなわち、波長 1 . 3 0 μm の信号光成分と波長 1 . 5 5 μm の信号光成分とは、互いに各モードの伝搬定数が異なるため、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 内を伝送する際にそれぞれ異なる挙動を示す。この性質を利用して、実施の形態 1 2 に係る光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路 2 1 0 1 のスラブ長 L を、波長 1 . 3 0 μm の信号光の光量移動と波長 1 . 5 5 μm の信号光の光量移動と間の位相差が、逆相（すなわち、 π の整数倍）になる大きさに設定している。このように構成することにより、マルチモード干渉のセルフイーメージ

ング原理に従って、波長 $1.30\ \mu\text{m}$ の信号光成分の入射光と同一のプロファイルを持つ像と、波長 $1.55\ \mu\text{m}$ の信号光成分の入射光と同一のプロファイルを持つ像とを、互いに異なる位置に形成することができる。そして、互いに異なる場所に形成される2つの像を、それぞれ出射光 2108 及び出射光 2109 として出射させて光分波が達成される。

一方、(ii) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、厚さ方向の屈折率分布の影響を受けるので、図 21B に示すように、中心面に沿って厚さ方向に蛇行しながら伝播する。すなわち、中心面から離れる方向へ進む光は、常に相対的に屈折率が高い部分から小さい部分へ進むので、進むにつれて徐々に進行方向と厚さ方向のなす角度が大きくなり、中心軸から最も離れた位置で 90° なる。また、中心面へ近づく方向へ進む光は、常に相対的に屈折率が小さい部分から大きい部分へ進むので、進むにつれて徐々に進行方向と厚さ方向のなす角度が小さくなり、中心面と交差する位置で最小となる。(ii) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光は、蛇行しながらも感じる屈折率は常に屈折率 n_0 よりも小さいので、(i) 厚さ方向の中心面内を伝送する光よりも速度は早くなる。

ここで、屈折率分布が前述した(数1)に示す2次関数の屈折率分布である場合、(ii) 厚さ方向の中心面内を伝送しない光の中心面に平行な伝送速度の成分は、(i) 厚さ方向の中心面内を伝送する光の伝送速度と等しくなる。このことは、厚さ方向のモード分散がないことを意味し

ている。従って、入射光の（ i i ）厚さ方向の中心面内を伝送しない光の中心面に平行な成分（蛇行する光の厚さ方向に垂直な方向成分）は、（ i ）厚さ方向の中心面内を伝送する光と同様に、出射面で幅方向の中心に対して対称に2分波される。

入射光の（ i i ）厚さ方向の中心面内を伝送しない光の中心面に垂直な成分（蛇行する光の厚さ方向成分）は、蛇行する光の伝播位置に応じて変化するので、出射光の状態は特定できない。ところが、この蛇行する光の厚さ方向成分は、厚さ方向のモード分散がないので、モード分散に起因する信号波形の乱れの影響を受けない。このため、あたかも幅方向についてもモード分散の影響が無い場合と等価の振る舞いをする。従って、2個の出射光は、それぞれ多重入射光のそれぞれの波長に対応する信号光成分と同じ像を有することになる。以上の結果から、（ i i ）厚さ方向の中心面内を伝送しない光（蛇行する光）は、（ i ）の場合と同じようにスラブ導波路形状に応じて幅方向の中心対称に入射光と同じ像として2分波される。

上記の説明のように、入射光は屈折率分布スラブ導波路2101の厚さ方向の全ての固有モードについて等しく2分波するので、入射面の幅方向の中心から所定距離だけ離れた位置に多重入射光が入射すれば、厚さ方向の中心からの位置ずれや大きな広がり角度を有している場合であっても2分波として機能する光デバイスを得ることができる。なお、入射光の幅方向の中心からの位置ずれは出射光の分波比のアンバランスの原因となるので、同等の出射光を得

たい場合、できるだけ位置ずれが無い方がよい。しかしながら、この位置ずれを積極的に利用して分波される信号光の強度比の調整をすることも可能である。

なお、2つの波長の間で逆相となる位置を決定する場合、2個の出射光の互いの光量の比が、最大になる幅方向の位置により定める方法、2個の出射光の互いの光量が最小になる幅方向の位置により定める方法のいずれを採用してもよい。前者の方法を採用した場合、出射光の損失を小さくすることができ、伝送される信号光の利用効率を向上させることができる。後者の方法を採用した場合、出射光に含まれるエラー成分を小さくすることができるので、伝送エラーを小さくすることができる。

なお、実施の形態1～12では、屈折率分布スラブ導波路への入出力方法として端面への垂直入出射の例を示したが、これに限られない。図15Aは、屈折率分布スラブ導波路の入出射方式の一例を示す斜視図、図15Bは、屈折率分布スラブ導波路の入出射方式の他の例を示す斜視図、図16は、屈折率分布スラブ導波路の入出射方式のさらに他の例を示す斜視図である。例えば、屈折率分布スラブ導波路の入出射端面を 45° に傾斜させて反射面1502及び反射面1503を形成し、厚さ方向に垂直な方向から入射する入出射光を反射面1502及び反射面1503で反射させて光路を 90° 折り曲げる反射方式（図15A）を採用してもよい。また、屈折率分布スラブ導波路の入出射端面の近傍に厚さ方向の面に近接してプリズム1602を設け、プリズム1602に入出射する光を光バスに結合す

るカプラー方式（図 1 6）を採用してもよい。また、プリズム 1 6 0 2 の代わりに回折格子などの回折光学素子を用いてもよい。また、屈折率分布スラブ導波路を電気基板 1 5 0 3 により挟み込んで形成した電気・光ハイブリッド基板にした場合、図 1 5 B に示すように、入出射端面を 45° に傾斜させて反射面を形成した屈折率分布スラブ導波路を使用し、電気基板の 45° に傾斜させて反射面とした部分に垂直入射光を通す貫通穴 1 5 0 4 を設けるとよい。

また、実施の形態 1 ～ 1 2 では、シート状の屈折率分布スラブ導波路を単一平面上としたが、これに限られない。図 1 7 A は、屈折率分布スラブ導波路の形状の一例を示す斜視図、図 1 7 B は、屈折率分布スラブ導波路の形状の他の例を示す斜視図である。図 1 7 A のように、屈折率分布スラブ導波路 1 7 0 1 は、長さ方向及び厚さ方向を含む任意の相異なる 2 個の断面において、厚さ方向の中心位置が、常に同一の曲線を描くように湾曲（図 1 7 A）していてもよい。また、屈折率分布スラブ導波路 1 7 0 2 は、長さ方向及び厚さ方向を含む任意の相異なる 2 個の断面において、厚さ方向の中心位置が、異なる曲線を描くように振れて（図 1 7 B）いてもよい。これは、一般的な厚さ方向に屈折率が一定のスラブ導波路では、湾曲や振れによって境界面で光が反射する時の入射角の変化による分散や損失の影響が避けられないのに対して、厚さ方向の中心に極大値を有する屈折率分布を有するスラブの場合は、光がスラブの境界面に到達することが無く、スラブの境界面の状態に関係なく伝播するからである。

なお、上記では入出力光としてマルチモード光に限定しているが、結合ロスの問題にしなければ、シングルモード光でも何ら問題は無い。

(実施の形態 13)

図 23 は、本発明の実施の形態 13 に係る光 2 分岐器である光デバイスの構成概要図である。実施の形態 13 に係る光デバイスは、図 23 に示すように、第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2301 と、第 2 の屈折率分布スラブ導波路 2302 と、第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2303 とを中心に構成される。

第 1 乃至第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2301 ～ 2303 は、いずれも xz 平面に平行に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。第 1 乃至第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2301 ～ 2303 は、厚さ方向の中心位置に最大屈折率 n_{\max} を持ち、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない厚さ方向の屈折率分布を有する。第 1 乃至第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2301 ～ 2303 は、幅方向には一定の屈折率を有し、屈折率分布を持たない。

第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2301 は、実施の形態 1 に係る光 2 分岐の場合において説明した屈折率分布スラブ導波路と同一である。すなわち、第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2301 のスラブ長 L_1 は、幅方向の基本モード幅 W_0 と、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率 n_0 と、入射光の波長 λ との関数となり、ほぼ $n_0 \times W_0^2 / (2\lambda)$ である。

第 2 の屈折率分布スラブ導波路 2302 及び第 3 の屈折

率分布スラブ導波路 2 3 0 3 は、実施の形態 4 に係るクロスシートバスと同一である。すなわち、第 2 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 及び第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 3 のスラブ長 L_2 は、幅方向の基本モード幅 W_0 と、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率 n_0 と、入射光の波長 λ の関数となり、いずれも、ほぼ $4 \times n_0 \times W_0^2 / \lambda$ である。

実施の形態 1 3 に係る光デバイスは、図示しない入射部から第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 の入射面の幅方向の中心位置に入射光を入射させる。第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 は、入射面の幅方向の中心に入射した入射光を伝送し、セルフイメージング原理に従って、出射面の幅方向の中心に対称な 2 つの出射光を生成する。

第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 から出射した出射光の内、一の出射光は、第 2 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 2 の入射面の幅方向の中心から所定の距離離れた位置に入射する。第 2 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 2 は、入射した入射光を伝送し、セルフイメージング原理に従って、出射面の入射光と幅方向の中心に対して対称な位置に出射光を生成する。

第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 から出射した出射光の内、他の出射光は、第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 3 の入射面の幅方向の中心から所定の距離離れた位置に入射する。第 3 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 3 は、入射した入射光を伝送し、セルフイメージング原理に従って、出射面の入射光と幅方向の中心に対して対称な位

置に出射光を生成する。

ここで、第1の屈折率分布スラブ導波路2301の基本モードの幅を W_0 と、第2の屈折率分布スラブ導波路2302の入射面における幅方向の中心から入射光の入射位置までの所定の距離を x_1 と、第3の屈折率分布スラブ導波路2303の入射面における幅方向の中心から入射光の入射位置までの所定の距離を x_2 とする。この場合において、第1の屈折率分布スラブ導波路2301の出射面での分離幅 d_1 は、セルフイメージング原理によれば、 $d_1 = W_0 / 2$ に等しい。ところが、第2の屈折率分布スラブ導波路2302及び第3の屈折率分布スラブ導波路2303から出射したそれぞれの出射光同士との分離幅 d_2 は、 $d_2 = W_0 / 2 + 2 \times x_1 + 2 \times x_2$ に等しく大幅に拡大している。

このように、実施の形態13に係る光デバイスは、基本モードの幅 W_0 を変化させることなく、分離幅を大きくすることができる。例えば、第1の屈折率分布スラブ導波路2301のみで光2分岐を構成する場合、2分岐後の分離幅は $W_0 / 2$ となり、直径 $125\ \mu\text{m}$ の光ファイバを接続する場合は $W_0 = 250\ \mu\text{m}$ 以上が必要である。この場合、第1の屈折率分布スラブ導波路2301の長さは $L = 35,000\ \mu\text{m}$ 以上となり、大型化が避けられない。さらに、直径が $200 \sim 1,000\ \mu\text{m}$ のプラスチック光ファイバを接続する場合、 $L > 100,000\ \mu\text{m}$ となる（ L は、 W_0 の2乗に比例）。

一方、第2屈折率分布スラブ導波路2302及び第3屈

折率分布スラブ導波路 2 3 0 3 を使用した場合、2 つの出射光の移動量は $2 \times x_1 + 2 \times x_2$ になる。 x_1 及び x_2 の値は、第 2 屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 2 及び第 3 屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 3 の半幅まで大きくできる。したがって、第 1 屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 のみを用いて同等の分離幅を得ようとした場合より、スラブ長 L を小さくできる。このように、第 1 の屈折率分布スラブ導波路 2 3 0 1 が分離幅の小さな分岐器であっても、第 2 と第 3 屈折率分布スラブ導波路を接続することにより容易に分離幅を拡大することができる。

図 2 4 は、本発明の実施の形態 1 3 の変形例 1 に係る 3 個以上の信号光の間隔拡大のための光デバイスの要部を示す上面図である。実施の形態 1 3 の変形例 1 に係る光デバイスは、図 2 4 に示すように、幅方向に並べられた複数の屈折率分布スラブ導波路を備えている。各屈折率分布スラブ導波路は、いずれも実施の形態 4 に係るクロスシートバスの場合において説明した屈折率分布スラブ導波路と同一である。

実施の形態 1 3 の変形例 1 に係る光デバイスは、図面の上から順に、幅方向において第 $k - 1$ 番目に配置される第 $k - 1$ の屈折率分布スラブ導波路 2 4 0 1 と、幅方向において第 k 番目に配置される第 k の屈折率分布スラブ導波路 2 4 0 2 と、幅方向において第 $k + 1$ 番目に配置される第 $k + 1$ の屈折率分布スラブ導波路 2 4 0 3 とを中心に構成される。

実施の形態 1 3 の変形例 1 に係る光デバイスにおいて、

3 個以上の信号光の間隔を拡大するためには、以下の 2 つのパターンを適宜組み合わせて伝送を行う。

(1) 隣合う第 k 及び第 $k + 1$ の屈折率分布スラブ導波路のように、入射位置と幅方向の中心との間の関係を互いに異方向にする方法である。この場合、信号光の間隔を大幅に拡大することが可能である。

(2) 隣合う第 k 及び第 $k - 1$ の屈折率分布スラブ導波路のように、入射位置と幅方向の中心との間の関係を互いに同方向にし、光デバイス全体の中心により近くに入射位置を持つ第 k の屈折率分布スラブ導波路の入射位置と幅方向の中心と間の距離を、第 $k - 1$ の屈折率分布スラブ導波路の入射位置と幅方向の中心と間の距離より小さくする方法である。

これら (1) 及び (2) に記載した方法を適宜組み合わせることにより、3 以上の信号光同士の間隔を拡大することが可能になる。

図 2 5 は、本発明の実施の形態 1 3 の変形例 2 に係る信号光の間隔拡大のための光デバイスの要部を示す上面図である。実施の形態 1 3 の変形例 2 に係る光デバイスは、図 2 4 に示すように、長さ方向に入射位置をずらせて並べられた複数の屈折率分布スラブ導波路を備えている。各屈折率分布スラブ導波路は、いずれも実施の形態 4 に係るクロスシートバスの場合において説明した屈折率分布スラブ導波路と同一である。

実施の形態 1 3 の変形例 2 に係る光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路を長さ方向に多段に接続している。すな

わち、第 1 段の屈折率分布スラブ導波路 2 5 0 1 からの出射光を、第 2 段の屈折率分布スラブ導波路 2 5 0 2 の入射光として接続し、第 2 段の屈折率分布スラブ導波路 2 5 0 2 からの出射光を、順に第 n 段の屈折率分布スラブ導波路 2 5 0 3 の入射光として接続している。このとき、実施の形態 1 3 の変形例 2 に係る光デバイスは、各屈折率分布スラブ導波路からの出射位置が、幅方向の中心に対して常に同方向にずれるよう配置する。このように配置することにより、出射光を幅方向に移動させることができる。

なお、以上説明した光デバイスは、いずれも 4 角形のそれぞれ独立した屈折率分布スラブ導波路をそれぞれ接続して分離幅を拡大する構成を説明したが、これに限られない。例えば、複数のシート状多モード導波路が接続した状態の屈折率分布スラブ導波路を製造してもよい。

（実施の形態 1 4）

図 2 6 は、本発明の実施の形態 1 4 に係るビーム変換部を有する光デバイスの構成の概要を示す斜視図である。実施の形態 1 4 に係る光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 と、入射側光ファイバ 2 6 2 0 と、第 1 の出射側光ファイバ 2 6 3 0 と、第 2 の出射側光ファイバ 2 6 3 5 と、入射側ビーム変換部 2 6 4 0 と、第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 と、第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 とを備える。

屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 は、実施の形態 1 の光デバイスを構成する屈折率分布スラブ導波路 1 0 1 と同一の構成を有し、光 2 分岐を行う所定のスラブ長 L を持つ。

入射側光ファイバ 2 6 2 0 と、第 1 の出射側光ファイバ 2 6 3 0 及び第 2 の出射側光ファイバ 2 6 3 5 は、いずれも G I (G r a d e d - I n d e x) 型のマルチモード光ファイバである。入射側光ファイバ 2 6 2 0 と、第 1 の出射側光ファイバ 2 6 3 0 及び第 2 の出射側光ファイバ 2 6 3 5 は、いずれも中心部が最大屈折率であり、周辺に向かって屈折率がほぼ 2 次関数に従って減少する屈折率分布を持つ。

入射側ビーム変換部 2 6 4 0 は、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 の入射面 2 6 1 2 と、入射側光ファイバ 2 6 2 0 の出射側端面 2 6 2 2 との間に配置される。入射側ビーム変換部 2 6 4 0 は、ほぼ円筒形状をなし、円筒の中心軸において極大となり周辺に向かって屈折率が低下する屈折率分布を持つ。入射側ビーム変換部 2 6 4 0 の屈折率分布は、中心を極大とし周辺に向けてほぼ 2 次関数に従って変化する。

入射側ビーム変換部 2 6 4 0 は、入射側光ファイバ 2 6 2 0 側から屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 側へ向けて次第に変化が大きくなる屈折率分布を持つ。ここで、図 2 6 に記載したグラフに、入射側ビーム変換部 2 6 4 0 の入射側光ファイバ 2 6 2 0 側の端面 2 6 4 1 の屈折率分布を A とし、入射側ビーム変換部 2 6 4 0 の屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 側の端面 2 6 4 2 の屈折率分布を B として図示する。グラフからわかるように、屈折率分布 A は、屈折率分布 B よりも緩やかな変化を示す。

第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 は、屈折率分布スラ

ブ導波路 2 6 1 0 の出射面 2 6 1 3 と、第 1 の出射側光ファイバ 2 6 3 0 の入射側端面との間に配置される。第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 は、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 の出射面 2 6 1 3 と、第 2 の出射側光ファイバ 2 6 3 5 の入射側端面との間に配置される。第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 及び第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 は、ほぼ円筒形状をなし、円筒の中心軸において極大となり周辺に向かって屈折率が低下する屈折率分布を持つ。第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 及び第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 の屈折率分布は、中心を極大とし周辺に向けてほぼ 2 次関数に従って変化する。

第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 は、第 1 の出射側光ファイバ側 2 6 3 0 側から屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 側へ向けて次第に変化が大きくなる屈折率分布を持つ。第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 は、第 2 の出射側光ファイバ側 2 6 3 1 側から屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 側へ向けて次第に変化が大きくなる屈折率分布を持つ。変化の様子は、前述した入射側ビーム変換部 2 6 4 0 を逆方向に向けた分布になっている。

以上の構成により、入射側光ファイバ 2 6 2 0 から出射されたマルチモードの信号光は、入射側ビーム変換部 2 6 4 0 に入射して、長さ方向に伝送される。入射側ビーム変換部 2 6 4 0 は、屈折率分布の長さ方向の変化によって、入射側光ファイバ 2 6 2 0 のモードフィールド（ビームスポット径）を、小さなモードフィールド（ビームスポット径）に変換する。モードフィールドが小さく変換された信

号光は、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 の入射面上の幅方向の中心位置に入射光として入射する。屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 は、実施の形態 1 において説明したように、入射光を長さ方向に伝送し、セルフイメージング原理に従って出射面近傍に 2 個の像を形成し、この像を出射光として出射する。

出射した 2 個の信号光は、それぞれ第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 及び第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 に入射して、長さ方向に伝送される。第 1 の出射側ビーム変換部 2 6 5 0 は、屈折率分布の長さ方向の変化によって、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 のモードフィールド（ビームスポット径）を、大きなモードフィールド（ビームスポット径）に変換する。第 2 の出射側ビーム変換部 2 6 5 5 は、屈折率分布の長さ方向の変化によって、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 のモードフィールド（ビームスポット径）を、大きなモードフィールド（ビームスポット径）に変換する。モードフィールドが大きく変換された信号光は、第 1 の出射側光ファイバ 2 6 3 0 及び第 2 の出射側光ファイバ 2 6 3 5 へ入射した後、伝送される。

このように、実施の形態 1 4 に係る光デバイスは、屈折率分布スラブ導波路へ入出射する信号光のモードフィールドを変換するビーム変換部を備えているので、屈折率分布スラブ導波路 2 6 1 0 に小さなモードフィールドを持つ入射光を入射させることができる。したがって、セルフイメージング原理により、出射光のモードフィールドを小さくすることができる。

従来、屈折率分布スラブ導波路の幅に対してP O Fのようなコア径（モードフィールド、ビームスポット径）の占める割合が大きな光ファイバを接続すると、セルフイメージング原理より、出力側にも入射光と同じプロファイルを持つビームスポット径の大きな光が出力されるので、出射光の間隔を大きくすることが困難になる。したがって、信号光の分岐数を多くすることができなかった。一方、実施の形態14に係る光デバイスは、出射光のモードフィールドを小さくすることができるので、分岐数を増やすことが容易である。

なお、入射のモードフィールドが小さくなると、分岐された複数の出射光の間隔も小さくなる。これに対しては、出力位置が平行移動できるように出力側ビーム変換部に角度をつけたり、S字型にして緩やかなカーブを付けることで、コア径の大きな光ファイバを出力側に接続することができる。また、上記例では、屈折率分布スラブ導波路2610は、実施の形態1の光2分岐の光デバイスに用いられるものであったが、他の実施の形態で説明したストレートシートバス、クロスシートバス、スターカプラ、光スイッチ等を適用可能であることはいうまでもない。この場合、入出射される信号光の数に応じて、入出射側光ファイバ及び入出射側ビーム変換部の数を調整すればよい。

図27は、本発明の実施の形態14の変形例1に係る光デバイスの構成の概要を示す斜視図である。実施の形態14の変形例1に係る光デバイスは、実施の形態14の光デバイスとほぼ同一の構成を有するので、相違する部分のみ

説明する。また、同一の符号は同一の構成を示す。

実施の形態 14 の変形例 1 に係る光デバイスは、実施の形態 2 で説明した光 N 分岐の光デバイスにおいて、 $N = 5$ とした屈折率分布スラブ導波路 2710 を備えている。実施の形態 14 の変形例 1 に係る光デバイスは、厚さ方向の中心に最大屈折率を持ち、厚さ方向にのみほぼ 2 次関数に従って屈折率が減少する屈折率分布を持つ屈折率分布導波路からなる入射側ビーム変換部 2740 を備える。また、実施の形態 14 の変形例 1 に係る光デバイスは、厚さ方向の中心に最大屈折率を持ち、厚さ方向にのみほぼ 2 次関数に従って屈折率が減少する屈折率分布を、それぞれ持つ 5 個の屈折率分布導波路からなる出射側ビーム変換部 2750 を備える。

入射側ビーム変換部 2720 の屈折率分布導波路は、入射側光ファイバ 2620 側から屈折率分布スラブ導波路 2710 側へ向けて、幅方向の大きさが減少する形状を持つ。出射側ビーム変換部 2730 の各屈折率分布導波路は、各出射側光ファイバ 2630 側から屈折率分布スラブ導波路 2710 側へ向けて、幅方向の大きさが減少する形状を備える屈折率分布導波路である。このように、幅方向の大きさが変化する屈折率分布導波路を入出射側のビーム変換部に用いた場合であっても、モードフィールドを変換することが可能である。

図 28A は、本発明の実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバイスの構成の概要を示す上面図である。また、図 28B は、本発明の実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバ

イスの出射側ビーム変換部 2850 の一例を示す断面図、図 28C は、本発明の実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバイスの出射側ビーム変換部 2850 の他の例を示す断面図である。実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバイスは、実施の形態 14 の光デバイスとほぼ同一の構成を有するので、相違する部分のみ説明する。また、同一の符号は同一の構成を示す。

実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバイスは、実施の形態 2 で説明した光 N 分岐の光デバイスにおいて、 $N = 4$ とした屈折率分布スラブ導波路 2810 を備えている。実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバイスは、変形例 1 において説明した入射側ビーム変換部 2740 を備える。実施の形態 14 の変形例 2 に係る光デバイスは、出力側光ファイバ 2830 の全てをカバーする単体の出射側ビーム変換部 2850 を備える。出射側ビーム変換部 2850 は、長さ方向に垂直な平面内で、屈折率分布スラブ導波路 2810 の幅方向中心に対応する中心に最大屈折率を持ち、周辺に向けて屈折率が低下する屈折率分布を持つ光伝送路である。出射側ビーム変換部 2850 は、断面が円あるいは矩形のいずれかの形状を有する。図 28B は、断面が円である出射側ビーム変換部 2850、図 28C は、断面が矩形である出射側ビーム変換部 2850 をそれぞれ示している。また、各断面図において、出射側光ファイバ群 2830 は、すべて断面内に配置される。このように、屈折率分布を持つ単一の光伝送路をビーム変換部に用いた場合であっても、モードフィールドを変換することが可能である。

なお、変形例 2 のように、ビーム変換部の構成は入射側で統一する必要な無く、適宜組み合わせることができる。例えば、入射側ビーム変換部に変形例 2 で説明した構成を適用して、出射側ビーム変換部に変形例 1 で説明した構成を適用する等してもよい。

図 2 9 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 3 に係る光デバイスの構成の概要を示す斜視図である。実施の形態 1 4 の変形例 2 に係る光デバイスは、実施の形態 1 4 の変形例 1 に係る光デバイスとほぼ同一の構成を有するので、相違する部分のみ説明する。また、同一の符号は同一の構成を示す。

本発明の実施の形態 1 4 の変形例 3 に係る光デバイスは、出射側光ファイバ群 2 9 3 0 のクラッドの一部が幅方向にカットして、光ファイバ同士の隣接間隔を小さくしている。このように、クラッドの一部をカットすることにより、出射側ビーム変換部 2 7 5 0 の幅方向の変形量を小さくすることができる。

（製造方法に係る実施の形態）

以下、各実施の形態で説明したシート状の屈折率分布スラブ導波路の製造方法を説明する。屈折率分布スラブ導波路の製造方法としては、例えば下記の 2 種類があげられる。

第 1 の製造方法は、屈折率の異なる極薄のフィルムを、厚さ方向の屈折率変化に合わせて積層して屈折率分布スラブ導波路を製造する方法である。第 1 の製造方法の具体例として、エポキシ系、アクリル系、ポリカーボネート系、

ポリイミド系の樹脂を採用する方法がある。これらの樹脂に添加されるフッ素や重水素や硫黄などの添加量を調整すると、屈折率が変化するので、さまざまな屈折率を有する極薄のフィルムを製造することができる。

第2の製造方法は、光伝送路の厚さ方向の組成を、厚さ方向の屈折率分布に合うように変化させる方法である。第2の製造方法の具体例として、以下に示す方法がある。

(1) シート状のガラス材料へイオン注入し、注入したイオンをガラス内部で分布制御して屈折率分布を形成する方法。

(2) シート状のポリシランを硬化する際に、酸素濃度を制御し、ポリシラン内部での酸素濃度に分布を施して屈折率分布を形成する方法。

(3) シート状の全フッ素樹脂を硬化する際に、樹脂内部で高屈折率低分子と低屈折率モノマーの分布を制御して屈折率分布を施す方法。

なお、(3)の全フッ素樹脂内部で屈折率分布形成方法は、他の樹脂に対しても応用が可能である。

以下、特に第2の製造方法の(2)のポリシランを用いて屈折率分布スラブ導波路を作成する方法について詳細に説明する。ポリシランは、紫外線露光や熱処理によって硬化する。このとき、ポリシラン構造の一部は、硬化される時に酸化されて屈折率のより小さなシロキサン構造に変化する。したがって、硬化したポリシランは、酸化されないでポリシラン構造のまま硬化した部分と、硬化される時に酸化されてシロキサン構造に変化した部分の比率を変化さ

せることにより、屈折率を制御することが可能になる。例えば、雰囲気中に酸素を含む環境で紫外線照射により硬化させた場合、ポリシランは、紫外線が照射された表面から内部へ向かって酸素濃度が低下した状態で硬化されるため、酸素濃度の低い内部から酸素濃度の高い表面に向かって屈折率が低下する屈折率分布構造を形成することが可能である。このようにして、シート状のポリシランの上下面から等しく紫外線を照射すれば、厚さ方向に中心対称の屈折率分布を得ることができる。

以下、光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の製造方法を説明する。図 30 は、屈折率分布スラブ導波路の製造方法の一例を示す説明図である。図 30 において、はじめに、実施の形態 1 で説明した屈折率分布スラブ導波路 301 のスラブ厚 D と同じ深さを有し、複数の屈折率分布スラブ導波路 301 の大きさに相当する凹部 3001 を持つ透明成形型 3002 を準備する（第 1 の工程）。透明成形型 3002 は、紫外線に対して透明な材料により形成する。次に、透明成形型 3002 の凹部分 3001 に、ポリシラン 3003 を凹部 3001 からほぼはみ出さないように充填する（第 2 の工程）。この工程を、図 30 A に示す。

次に、凹部 3001 に溜めたポリシラン 3003 に対して、厚さ方向の上下から紫外線 3004 を照射すると同時に加熱する。この工程を、図 30 B に示す。その後、ポリシラン 3003 を硬化させる（第 3 の工程）。この工程を、図 30 B に示す。

ポリシラン 3003 が硬化した後、所望の屈折率分布ス

ラブ導波路 3 0 1 0 の形状に切断する（第 4 の工程）。このようにして、複数の屈折率分布スラブ導波路を製造することができる。切断した後の透明成型型 3 0 0 2 は、そのまま屈折率分布スラブ導波路 3 0 1 0 の基板 3 0 0 5 として使用することができる。もちろん、基板 3 0 0 5 を除去してもよい。

ただし、凹部 3 0 0 2 の側壁は、最後に切断削除されるので垂直でなくても良く、テーパ一面であってもよい。また、屈折率分布スラブ導波路 3 0 1 0 の切断面を光学研磨してもよい。また、所望の厚さを持つシート状ポリシランを形成できる場合、側壁は、必ずしも必要ではない。

図 3 1 は、屈折率分布スラブ導波路の製造方法の他の例を示す説明図である。図 3 1 において、はじめに、実施の形態 1 で説明した屈折率分布スラブ導波路 3 1 1 0 のスラブ厚 D と同じ深さを有し、単一の屈折率分布スラブ導波路 3 1 1 0 の大きさに相当する凹部 3 0 0 1 を持つ透明成型型 3 1 0 2 を準備する（第 1 の工程）。透明成型型 3 1 0 2 は、紫外線に対して透明な材料により形成する。次に、透明成型型 3 1 0 2 の凹部分 3 1 0 1 に、ポリシラン 3 1 0 3 を凹部 3 1 0 1 からほぼはみ出さないように充填する（第 2 の工程）。この工程を、図 3 1 A に示す。

次に、凹部 3 1 0 1 に溜めたポリシラン 3 1 0 3 に対して、厚さ方向の上下から紫外線 3 0 0 4 を照射すると同時に加熱する。この工程を、図 3 1 B に示す。その後、ポリシラン 3 1 0 3 を硬化させる（第 3 の工程）。この工程を、図 3 1 B に示す。

ポリシラン 3 1 0 3 が硬化した後、入出射端面に相当する部分を屈折率分布スラブ導波路 3 1 1 0 の形状に切断する（第 4 の工程）。このようにして、屈折率分布スラブ導波路を製造することができる。切断した後の透明成型型 3 1 0 2 は、そのまま屈折率分布スラブ導波路 3 1 1 0 の基板 3 1 0 5 として使用することができる。もちろん、基板 3 0 0 5 を除去してもよい。

ただし、凹部の入出射面は最後に切断削除されるので垂直でなくても良くてテーパーが付いていても良いが、幅方向の側壁面 3 1 0 6 は 10° 以下の垂直面が望ましい。また、凹部の入出射面は、切断削除されるだけではなく、入出射位置の近傍にのみ形成してもよいまた、切断面を光学研磨しても良いが、光入出射面方向の透明成型型 3 1 0 2 の肉厚が $10\ \mu\text{m}$ 以下であれば透明成型型 3 1 0 2 自体を切断や研磨して入出射面にしても良い。

このように、透明成型型に設けた凹部分に充填した樹脂を溜めるようにすることで、粘土の低い樹脂であっても膜厚を任意に厚くすることができる。したがって、コア径の大きな光ファイバを入出射側に用いることが可能な光伝送路に対応することができる。

図 3 2 は、ポリシランを用いた屈折率分布のメカニズムを説明する説明図である。前述のように、ポリシランは、紫外線露光や熱処理によって起こる硬化時の酸化により屈折率のより小さなシロキサン構造（図 3 2（e））に変化する。このため、酸化しないポリシラン構造（図 3 2（d））部分と酸化により発生するシロキサン構造部分の比率

を制御することで屈折率分布をつけることができる。図からわかるように、ポリシランを酸素雰囲気中に配置し（図 3 2 A）、紫外線露光と加熱とのいずれか一方を行う（図 3 2 B）ことにより、酸素濃度が薄い中心部はポリシラン構造が多く、酸素濃度が濃い表面部はシロキサン構造が多い成形体を得る（図 3 2 C）。

ポリシランの膜厚が $50\ \mu\text{m}$ 以下である場合、雰囲気中の酸素によりポリシラン内では表面から内部に向かって酸素濃度が低下する。このため、自然に酸素濃度の低い内部から酸素濃度の高い表面に向かって屈折率が低下する屈折率分布を形成することとなる。また、ポリシランの膜厚が $50\ \mu\text{m}$ 以上である場合、雰囲気中の酸素以外に、予め硬化前のポリシランの内部に酸素あるいは酸化物を所望の分布で拡散させておくことで、酸化時の屈折率分布を任意に制御することも可能である。

また、ポリシランを両面から対称的に酸化させることで厚さ方向の中心に対して対称形状の屈折率分布を形成することができる。ただし、UV 露光で硬化する場合に基板側から露光する場合は、UV に対して透明な材料、例えば、石英やパイレックスなどのガラスを使用し、基板側から露光しない場合は、ガラス以外にシリコンや樹脂など UV に対して不透明な材料でもかまわない。

図 3 3 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例 1 に係る光デバイスの製造方法を説明する説明図である。以下、本発明の実施の形態 1 4 に係る変形例 1 を例にして、光デバイスの製造方法を説明する。

透明成形型 3 3 0 1 は、予め屈折率分布マルチモード導波路に相当する凹部 3 3 0 2 と、入射側ビーム変換部に相当する凹部 3 3 0 3 と、出射側ビーム変換部に相当する凹部 3 3 0 4 とが形成される。また、透明成形型 3 3 0 1 は、入射側光ファイバ 3 3 1 0 の位置決めを行うための V 溝 3 3 0 5 と、出射側光ファイバ 3 3 1 1 の位置決めを行うための V 溝 3 3 0 6 とが形成される。この透明成形型 3 3 0 1 の各凹部に、ポリシラン 3 3 2 0 を充填する。充填した後、各凹部に溜めたポリシラン 3 3 2 0 に対して、上下からの紫外線を照射すると同時に加熱して、ポリシラン 3 3 0 1 を硬化させる。最後に、V 溝 3 3 0 5 及び V 溝 3 3 0 6 に、光ファイバを配置して光デバイスを製造することができる。

ただし、凹部 3 3 0 2 の幅方向を決定する側壁面 3 3 3 0 は 10° 以下の垂直面にすることが望ましい。このように、透明成形型に設けた凹部に充填した樹脂を溜めるようにすることで、粘度の低い樹脂であっても膜厚を任意に厚くすることができる。したがって、入出射側の光伝送路にコア径の大きな光ファイバを使用した場合であっても、対応することができる。

以上の例では、透明成形型を屈折率分布スラブ導波路の基板として、光デバイスの一部として利用したが、硬化したポリシランを離型してもよい。離型することにより、透明成形型の再利用が可能となるので、透明成形型の製造コストを低減することができる。

図 3 4 及び図 3 5 は、本発明の実施の形態 1 4 の変形例

1に係る光デバイスの製造方法の別例を説明する説明図である。図34において、透明成形型3401は、予め屈折率分布マルチモード導波路に相当する凹部3402と、入射側ビーム変換部に相当する凹部3403と、出射側ビーム変換部に相当する凹部3404とが形成される。この透明成形型3401により、入出射側ビーム変換部が一体的に形成された屈折率分布スラブ導波路3410を、今まで述べた紫外線露光等の方法で成形する。屈折率分布スラブ導波路3410は、硬化後、透明成形型3401から離型する。

次に、図35において、予め屈折率分布スラブ導波路3401に相当する凹部3502と、入射側光ファイバ3520の位置決めを行うV溝3503と、出射側光ファイバ3530の位置決めを行うV溝3504とが形成されたアセンブリ型3501を準備する。このアセンブリ型3501に、屈折率分布スラブ導波路3401と、入射側光ファイバ3520と、出射側光ファイバ3530とを配置することにより、光デバイスを製造することができる。

この製造方法によれば、屈折率分布スラブ導波路3401の成形に用いた透明成形型は、離型により再利用できるため、コストダウンが可能である。また、入出射側ビーム変換部の位置決め調整が不要であるため製造の際の生産性向上を図ることができる。また、アセンブリ型3501は、製造工程において紫外線露光をする必要がないため材料の限定が小さく、低価格な型材料を選択することができる。また、アセンブリ型3501を使用することにより、入

出射側光ファイバの位置決め調整が容易であるため製造の際の生産性向上を図ることができる。

なお、図 3 4 及び図 3 5 の出射側ビーム変換部は、出射側光ファイバ側と G I 型マルチモードスラブ導波路側の光軸が一致しているが、これに限られない。実施の形態 1 4 の変形例 1 に説明したように、各出射側ビーム変換部間隔が、屈折率分布スラブ導波路から出射側光ファイバに向かって次第に大きくすると、屈折率分布スラブ導波路の形状を小さくできる。

以上説明した製造方法は、光 N 分岐の光デバイスだけでなく、各実施の形態で説明したストレートシートバス、クロスシートバス、光スイッチ、スターカップラ等の光デバイスに適用可能であることはいうまでもない。

（実施の形態 1 5）

図 3 6 A は、本発明の実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 の斜視図である。また、図 3 6 B は、マルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 の正面図である。図 3 6 A において、座標系を図中に示すように定め、紙面の下方向を y 方向と、紙面の右向きを z 方向と、y 方向及び z 方向に垂直な方向を x 方向と定義する。

マルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 は、シート状光伝送路 5 1 0 1 と、入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 及び出射部 5 1 0 6 と、電気用基板 5 1 0 7 と、電気用基板 5 1 0 8 とを備える。シート状光伝送路 5 1 0 1 は、y 方向の正の方向に沿って、電気用基板 5 1 0 7 と、シート状光伝送路 5 1 0 1 と、電気用基板 5 1 0 8 とを順に積層した 3

層構造を備えている。

シート状光伝送路 5 1 0 1 は、 y 方向（厚さ方向）の厚さが d で、 z x 平面に対して平行な 2 次元光伝送路である。シート状光伝送路 5 1 0 1 は、外部から入射した信号光を y 方向に閉じこめ、 z 方向（伝送方向）に伝送可能である。シート状光伝送路 5 1 0 1 は、 z 方向の両端に反射面 5 1 0 2 及び反射面 5 1 0 3 を持つ。

反射面 5 1 0 2 は、 z 方向の一方の端部に形成される。反射面 5 1 0 2 は、 y 方向の正方向に沿って入射する信号光を、 z 方向の正方向へ折り曲げるように、 z x 平面に対して 45° の角度をなす反射面である。

反射面 5 1 0 3 は、入射側に対して反対側である z 方向の他方の端部に形成される。反射面 5 1 0 3 は、 z 方向の正方向に沿って伝送する信号光を y 方向の負方向へ折り曲げるように、 z x 平面に対して 45° の角度をなす反射面である。

シート状光伝送路 5 1 0 1 は、 y 方向に屈折率分布を持つ。シート状光伝送路 5 1 0 1 は、 y 方向の厚さが半分の $d/2$ の位置にある z x 方向に平行な面（以下、中心部 5 1 0 1 a という）が最大屈折率 n_{\max} である。シート状光伝送路 5 1 0 1 は、中心部 5 1 0 1 a を対称面として、中心部 5 1 0 1 a からそれぞれ電気用基板 5 1 0 7 及び電気用基板 5 1 0 8 に向けて連続的に屈折率が減少していく屈折率分布を持つ。

また、シート状光伝送路 5 1 0 1 は、 z x 平面に平行な面内の屈折率が常に等しい。すなわち、シート状光伝送路

5 1 0 1 は、y 方向にのみ屈折率分布を持ち、他の方向には屈折率分布を持たない。

電気用基板 5 1 0 7 及び電気用基板 5 1 0 8 は、平板状である。電気用基板 5 1 0 7 は、発光素子 5 1 1 0 と、受光素子 5 1 1 1 と、受光素子 5 1 1 2 とを含む。

発光素子 5 1 1 0 は、信号光を発生させるための面発光レーザである。面発光レーザは、信号光となるレーザが y 方向の正方向に発振するように配置される。

また、受光素子 5 1 1 1 及び受光素子 5 1 1 2 は、信号光を受光するフォトダイオードである。フォトダイオードは、y 方向の負方向に沿って伝送される信号光を受光するように配置される。電気用基板 5 1 0 7 及び電気用基板 5 1 0 8 は、その他光デバイスを駆動するために必要な図示しない電気部品や光部品を実装する。

電気用基板 5 1 0 7 は、発光素子 5 1 1 0 に対応する位置に円筒状の貫通孔であるスルーホールを有する。このスルーホールの内部には、円筒状の入射部 5 1 0 4 が形成されている。また、電気用基板 5 1 0 7 は、受光素子 5 1 1 1 に対応する位置に円筒状の貫通孔であるスルーホールを有する。

このスルーホールの内部には、円筒状の出射部 5 1 0 5 が形成されている。同様に、電気用基板 5 1 0 7 は、受光素子 5 1 1 2 に対応する位置に円筒状の貫通孔であるスルーホールを有する。このスルーホールの内部には、円筒状の出射部 5 1 0 6 が形成されている。

入射部 5 1 0 4 は、シート状光伝送路 5 1 0 1 を構成す

る材料と同じ材料で作成される。入射部 5 1 0 4 は、円筒の中心軸に関して軸対称な屈折率分布を持ち、円筒の中心軸を最大屈折率 n_{max} とし、中心軸対称に中心軸から周辺へ離れるに従って連続的に屈折率が増加しない屈折率分布を持つ。入射部 5 1 0 4 の y 方向の長さは、信号光をシート状光伝送路 5 1 0 1 に平行光として入射するように決定されている。

入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 及び出射部 5 1 0 6 とは、いずれも等しい構造である。また、入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 と、出射部 5 1 0 6 とは、いずれもシート状光伝送路 5 1 0 1 と接着されている。入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 と、出射部 5 1 0 6 とは、マルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件に従って所定位置に形成される。なお、マルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件については、後述する。

上記の構成において、発光素子 5 1 1 0 の面発光レーザの発光点から発振した信号光は、入射部 5 1 0 4 に入射し、y 方向の正方向に進行する。その後、信号光は、入射部 5 1 0 4 からシート状光伝送路 5 1 0 1 に入射し、反射面 5 1 0 2 で z 方向の正方向に折り曲げられ、シート状伝送路 5 1 0 1 内を伝搬する。信号光は、シート状光伝送路 5 1 0 1 内で x 方向に拡散してマルチモードで z 方向の正方向に伝送される。その後、信号光は、反射面 5 1 0 3 で y 方向の負方向に折り曲げられる。

ここで、入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 と、出射部 5 1 0 6 とは、後述するマルチモード干渉のセルフイメージ

ーシング原理の条件に従って所定位置に形成されているので、信号光は、出射部 5 1 0 5 及び出射部 5 1 0 6 の位置で等エネルギーに二分割され、それぞれ出射部 5 1 0 5 及び出射部 5 1 0 6 に入射する。

出射部 5 1 0 5 に入射した信号光は、出射部 5 1 0 5 から出射して受光素子 5 1 1 1 のフォトダイオードの受光面で検出される。同様に、出射部 5 1 0 6 に入射した信号光は、出射部 5 1 0 6 から出射して受光素子 5 1 1 2 のフォトダイオードの受光面で検出される。

このように、出射部 5 1 0 6 は、出射部 5 1 0 5 と等しい構成を持ち、マルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件に従う所定位置に配置されている。このため、出射部 5 1 0 6 は、出射部 5 1 0 5 と等価であり、光学的な作用は等しい。したがって、以下の説明では、出射部 5 1 0 5 に基づいてのみ行い、出射部 5 1 0 6 の説明は同一であるため省略する。

なお、入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 と、出射部 5 1 0 6 とは、いずれも内部を伝送する信号光の光軸は、y 方向に平行であり、シート状光伝送路 5 1 0 1 の信号光の伝送方向である z 方向に直交している。したがって、入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 と、出射部 5 1 0 6 とは、いずれも非平行入射部である。

図 3 7 は、本発明の実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 の信号光が伝送される部分の断面図である。図 2 は、シート状光伝送路 5 1 0 1 及び入射部 5 1 0 4 を図 3 6 A 中の C - D - G - H 面を含む平面で切断

した断面の D - H 側と、シート状光伝送路 5 1 0 1 及び出射部 5 1 0 5 を図 3 6 A 中の E - F - I - J 面を含む平面で切断した断面の E - I 側を接続した断面図である。

ここで、C - D - G - H 面を含む平面は、y z 面に平行であり入射部 5 1 0 4 の中心軸を含む平面である。また、E - F - I - J 面を含む平面は、y z 面に平行であり出射部 5 1 0 6 の中心軸を含む平面である。

なお、図 3 7 において、等しい構成については図 3 6 と同じ符号を付している。図 3 7 において、発光素子 5 1 1 0 の発光点を発光点 5 1 1 0 a と、受光素子 5 1 1 1 の受光面上の受光点を受光点 5 1 1 1 a とする。

実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 では、信号光はシート状光伝送路 5 1 0 1 内で y 方向の正方向にのみ伝送される。このため、信号光の伝送方向の位相状態の議論を行う場合、信号光の x 方向の拡散は考慮しなくてよい。信号光の x 方向への拡散は、マルチモード干渉による信号光の強度分布の変化が原因であるためエネルギー伝搬を伴わず、信号光の x 方向には常に同位相となるからである。

したがって、図 3 7 において、伝送方向の位相状態を議論する場合、図 3 6 中の x y 面に平行な D - E - H - I 面は無視してよく、図 3 7 の C - D - G - H 面の D - H 側と、E - F - I - J 面の E - I 側とを接続した媒質中に記載された光路は、信号光の光路と等価になる。このように、以下に述べる実施の形態において、光路あるいは光路長という語を用いる場合、x 方向の拡散は無視していることと

する。

図 3 7 において、発光点 5 1 1 0 a から発振する信号光は、発散光であるからさまざまな光路を軌跡とする光線を含む。発光点 5 1 1 0 a から発振する信号光のうち、特に、最も信号光の光軸から離れた位置に入射する二つの光路 A 及び光路 B を検討する。なお、光路 A は、入射部 5 1 0 4 に入射する信号光の光軸に関して光路 B と対称な関係にある。図 3 7 において、光路 A を実線で表し、光路 B を点線で表す。

図 3 7 において、発光点 5 1 1 0 a から y 方向の正方向に発振した信号光は、発散光として入射部 5 1 0 4 に入射する。入射部 5 1 0 4 は、前述したように中心軸対称に中心軸から周辺へ離れるに従って連続的に屈折率が増加しない屈折率分布を持つ。このため、入射部 5 1 0 4 に入射した信号光のうち、入射部 5 1 0 4 に 90 度以外の角度をなして入射した光線は、直線状には伝送されず蛇行しながら進行する。

すなわち、光路 A に沿って伝送される光線は、屈折率の高い領域から屈折率の低い領域へ伝送され、次第に y 方向に平行に曲げられる。光路 B に沿って伝送される光線も、屈折率の高い領域から屈折率の低い領域へ伝送され、次第に y 方向に平行に曲げられる。

ここで、入射部 5 1 0 4 は、信号光がシート状光伝送路 5 1 0 1 に入射する際に平行光（コリメータ光）となるように y 方向の長さが決められている。すなわち、光路 A が、光路 B に平行になるように、入射部 5 1 0 4 の y 方向の

物理的な長さが決定されている。したがって、信号光は、平行光としてシート状光伝送路 5 1 0 1 に入射する。

光路 A は、シート状光伝送路 5 1 0 1 を垂直に横切って反射面 5 1 0 2 に達し、反射面 5 1 0 2 によって z 方向の正方向に折り曲げられる。一方、光路 B は、すぐに反射面 5 1 0 2 に達し、反射面 5 1 0 2 によって z 方向の正方向に折り曲げられる。光路 A が反射面 5 1 0 2 で折り曲げられることにより、すべての信号光がシート状光伝送路 5 1 0 1 の z 方向の正方向に伝送される。その後、光路 A 及び光路 B は、屈折率分布に従って蛇行しながら進行する。

光路 A は、反射面 5 1 0 3 に達し、反射面 5 1 0 3 によって y 方向の負方向に折り曲げられる。一方、y 方向の正方向に平行に入射した光路 B は、光路 A より遅れて反射面 5 1 0 3 に達し、反射面 5 1 0 3 によって y 方向の負方向に折り曲げられる。

このとき、シート状光伝送路 5 1 0 1 は、出射部 5 1 0 5 に出射する際に平行光となるように z 方向の構成が決められている。すなわち、光路 A が、光路 B に平行になるように、シート状光伝送路 5 1 0 1 の物理的な長さが決定されている。したがって、信号光は、平行光として出射部 5 1 0 5 に入射する。ここで、出射部 5 1 0 5 を伝送する信号光の光軸は、y 方向に平行であり、シート状光伝送路 5 1 0 1 の信号光の伝送方向である z 方向に直交している。なお、シート状光伝送路 5 1 0 1 の構成は、後に詳述する。

出射部 5 1 0 5 は、前述したように中心軸対称に中心軸

から周辺へ離れるに従って連続的に屈折率が増加しない屈折率分布を持つ。このため、出射部 5 1 0 5 に入射した信号光のうち、中心軸から離れた部分に入射した信号光は、直線状には伝送されず蛇行しながら進行する。

光路 A は、屈折率の低い領域から屈折率の高い領域へ伝送され、次第に対称光軸に接近する方向に曲げられる。光路 B も、屈折率の低い領域から屈折率の高い領域へ伝送され、次第に対称光軸に接近する方向に曲げられる。

出射部 5 1 0 5 は、屈折率分布及び y 方向の物理的長さが入射部 5 1 0 4 と等しい。このため、信号光は収束光として出射部 5 1 0 5 から出射し、受光点 5 1 1 1 a で結像する。

光路 A において、光路 B が反射面 5 1 0 2 に達した位置に対応する位置から、光路 A が反射面 5 1 0 2 に達した位置までの物理的な光路長を L_{A1} と定義する。光路 B において、光路 B が反射面 5 1 0 2 に達した位置から、光路 A が反射面 5 1 0 2 に達する位置に対応する位置までの物理的な光路長を L_{B1} とする。

また、光路 A において、光路 A が反射面 5 1 0 3 に達した位置から、光路 B が反射面 5 1 0 3 に達する位置に対応する位置までの物理的な光路長を L_{A2} と定義する。光路 B において、光路 A が反射面 5 1 0 3 に達した位置に対応する位置から、光路 B が反射面 5 1 0 3 に達した位置までの物理的な光路長を L_{B2} とする。

また、光路 A が反射面 5 1 0 2 に達した位置から、光路 A が反射面 5 1 0 3 に達する位置までの物理的距離を伝送

長 L と定義する。伝送長 L は、信号光が z 方向の正の方向に伝送される領域の物理的長さに相当する。

反射面 5 1 0 2 及び反射面 5 1 0 3 は、ともに光路を 90 度折り曲げるミラーとして機能するので、 y 方向及び z 方向の幾何学的形状は共通である。したがって、物理的な光路長 $L A 1$ は、物理的な光路長 $L B 1$ と等しい。同様に物理的な光路長 $L A 2$ は、物理的な光路長 $L B 2$ と等しい。

しかしながら、物理的な光路長 $L A 1$ に対応する光学的な光路長は、物理的な光路長 $L B 1$ に対応する光学的な光路長と一致しない。これは、反射面 5 1 0 2 で反射した後で光学的な光路長が異なるため、光路 A を軌跡とする光線の位相は、光路 B を軌跡とする光線の位相と一致しないためである。すなわち、光路 A と光路 B とは位相差が生じる。このように、屈折率分布を含むシート状光伝送路に、伝送される方向に対して垂直でない反射面を設けると、反射面は光路長差発生部として機能する。

光路 A と光路 B とは、位相差があるため、シート状光伝送路 5 1 0 1 の内部を伝送される信号光の強度ピーク位置がシフトする。光路 A が $L 1 A$ に対応する光路を伝送される間に信号光が感じる屈折率は、光路 B が $L 1 B$ に対応する光路を伝送される間に信号光が感じる屈折率よりも高い。

この結果、光路 A は、光路 B よりも位相が遅れてしまう。したがって、図 3 7 から明らかなように、両光路が交差する位置は、シート状光伝送路 5 1 0 1 の中心部 5 1 0

1 a とは一致せず、y 方向の正側にシフトしている。

また、シート状光伝送路 5 1 0 1 を z 方向に伝送される光線は、屈折率分布のために位相が乱れない。したがって、反射面 5 1 0 2 により発生した光路 A 及び光路 B の間の位相差は、そのまま反射面 5 1 0 3 へ伝送される。反射面 5 1 0 3 においても、同じメカニズムで、光路 A 及び光路 B の間に位相差を発生させる。

反射面 5 1 0 2 で発生する位相差を定量化する。図 3 8 A は、シート状光伝送路 5 1 0 1 及び入射部 5 1 0 4 を、図 3 6 A 中の C - D - G - H 面を含む平面で切断した断面である。また、図 3 8 B は、シート状光伝送路 5 1 0 1 の屈折率分布を表すグラフである。図 3 8 B において、縦軸は y 方向と一致させており、y 座標の原点を中心部 5 1 0 1 a とする。

屈折率分布定数を g とし、中心部 5 1 0 1 a における屈折率を n_{\max} とし、y 方向の屈折率分布を以下の (数 9) に示された二次関数で定義する。

$$n(y) = n_{\max} \left(1 - \frac{g^2 y^2}{2} \right) \quad (\text{数 9})$$

図 3 8 B において、横軸は屈折率 $n(y)$ であり、縦軸はシート状光伝送路 5 1 0 1 の y 方向の位置座標である。位置の原点はシート状光伝送路 5 1 0 1 の中心部 5 1 0 1 a である。図 3 8 B から明らかなように、(数 9) は上に凸の 2 次関数で、中心部 5 1 0 1 a の屈折率が最大屈折率 n_{\max} であり、中心部 5 1 0 1 a から y 方向の正負両方向に離れるにしたがって連続的かつ中心対称に屈折率が低下

していく屈折率分布である。

物理的な光路長を光学的な光路長へ変換するには、屈折率分布の関数を位置で積分すればよい。簡単のために、光路 A 及び光路 B を伝送する信号光が反射面 5 1 0 2 において反射する位置は、シート状光伝送路 5 1 0 1 の最大径の位置であるとする。

実際には、シート状光伝送路 5 1 0 1 を伝送される信号光は、幅方向に複数モードが励起されており、モードごとに実効屈折率が異なっている。MMI では、長さ方向の大きさは、幅方向に励起される 0 次モード光の実効屈折率の関数になるので、最大屈折率 n_{\max} を幅方向に励起される 0 次モード光の実効屈折率 n_0 に置換した方が都合がよい。したがって、以下の議論において、屈折率として幅方向に励起される 0 次モード光の実効屈折率 n_0 を用いることにする。なお、実効屈折率 n_0 は、最大屈折率 n_{\max} と、信号光の波長と、シート状光伝送路の形状により決定される。

光路 A の物理的な光路長 L_{1A} に対応する光学的な光路長は、屈折率分布の関数である（数 9）を、位置座標 y について $-d/2$ から $d/2$ まで積分したものに等しい。すなわち、光路 A の物理的な光路長 L_{1A} に対応する光学的な光路長は、図 3 8 B において屈折率分布を表す（数 9）のグラフと y 軸とが形成する領域 α の面積に等しい。

同様に、光路 B の物理的な光路長 L_{1B} に対応する光学的な光路長は、図 3 8 B において位置 $d/2$ における屈折率の値 $n(d/2)$ を、位置座標 y について $-d/2$ から

$d/2$ まで積分したものに等しい。すなわち、光路 B の物理的な光路長 $L_1 B$ に対応する光学的な光路長は、図 3.8 B において矩形の領域 β の面積に等しい。

したがって、反射面 5.1.0.2 により発生した光路 A 及び光路 B の間の光学的な光路長の差 ΔL は、以下の (数 1.0) で表わす。また、このときの光路 A と光路 B の間に発生する位相差 Δ は、以下の (数 1.1) で表される。ただし、屈折率として実効屈折率 n_0 を用いている。

$$\Delta L = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \left\{ n(y) - n\left(\frac{d}{2}\right) \right\} dy = 2 \int_0^{\frac{d}{2}} \left\{ n(y) - n\left(\frac{d}{2}\right) \right\} dy = \frac{n_0 g^2 d^3}{12} \quad (\text{数 1.0})$$

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{n_0 g^2 d^3}{6\lambda} \pi \quad (\text{数 1.1})$$

上記の位相差 Δ を具体的に数値計算した結果を表 1 に示す。なお、計算に際して屈折率分布定数 g は、 $d/2$ で中心から 1% 程度低下する値として設定している。また、中心部 5.1.0.1 a の屈折率に対応する実効屈折率は $n_0 = 1.5$ に設定している。

表 1

	シート状光伝送路の屈折率分布方向の径 [μm]			
	50	100	200	1000
屈折率分布定数 g [m m^{-1}]	5.6	2.8	1.414	0.28
位相差 Δ [ラジアン]	1.18π	2.35π	4.71π	23.5π

表 1 から明らかなように、反射面 5 1 0 2 において発生する光路 A 及び光路 B の間の位相差は、 π ラジアン以上である。光路 A 及び光路 B の間の位相差をゼロにしなければ、強度分布を維持したまま信号光を出射することができない。

そこで、位相差を補償する方法について説明する。はじめに、光路 A を伝送される信号光が反射面 5 1 0 2 に達した位置から、光路 A を伝送される信号光が反射面 5 1 0 3 に達する位置までの物理的距離（以下、伝送長という） L が、満足すべき条件を求める。

入射部 5 1 0 4 からシート状光伝送路 5 1 0 1 に入射する信号光及び、シート状光伝送路 5 1 0 1 から出射部 5 1 0 5 へ出射する信号光は、ともに平行光である。また、屈折率分布係数 g が与えられると、シート状光伝送路 5 1 0

1 を伝送する光線は、屈折率分布に従って周期 $2\pi/g$ で蛇行する。

したがって、シート状光伝送路 5 1 0 1 で、平行光として入射した信号光を平行光として出射させるためには、伝送長 L を周期 $2\pi/g$ の整数倍にすればよい。すなわち、伝送長 L は、以下の（数 1 2）を満足する必要がある。

$$L = \frac{2\pi}{g} j \quad (j = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{数 1 2})$$

一方、屈折率分布によって、光路 A の物理的な伝送長 L に対応する光学的な光路長は、光路 B の物理的な伝送長に対応する光学的な光路長と等しい。シート状光伝送路 5 1 0 1 の全体の光路 A 及び光路 B の間の光学的な光路長の差は、反射面 5 1 0 2 及び反射面 5 1 0 3 のみで発生すると考えてよい。このように、反射面 5 1 0 2 及び反射面 5 1 0 3 は、光路長差発生部である。

シート状光伝送路 5 1 0 1 の全体の光学的な光路長の差 ΔL_{total} は、反射面 5 1 0 2 に対して計算した（数 1 0）を 2 倍した以下の（数 1 3）の値と等しい。

$$\Delta L_{\text{total}} = 2\Delta L = \frac{n_0 g^2 d^3}{6} \quad (\text{数 1 3})$$

上記（数 1 3）は、光路 A の光学的な光路長が光路 B の光学的な光路長より ΔL_{total} の値だけ大きいことを意味している。したがって、（数 1 3）の値を信号光の波長の整数倍に一致させることにより、光路 A の位相と光路 B の位相との間の差をゼロにすることができる。すなわち、光路 A 及び光路 B の位相差をゼロにする条件は、以下の

(数 1 4) で表される条件である。

$$\Delta L_{total} = \frac{n_0 g^2 d^3}{6} = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3 \dots) \quad (\text{数 1 4})$$

このように、光路 A と光路 B との間の位相差は、シート状光伝送路 5 1 0 1 全体で発生する光路 A と光路 B との間の光学的な光路長の差を (数 1 4) を満足するように構成すれば、信号光の波長 λ の自然数倍となる。この結果、光路 A と光路 B との間の位相差は発生しない。

ここで、シート状光伝送路 5 1 0 1 は、次のように設計される。はじめに、(数 1 2) により伝送長 L を決定する。これにより、屈折率分布定数 g が決定される。次に、決定された屈折率分布定数 g と、あらかじめ与えられる信号光の波長 λ とを用いて (数 1 4) を調整する。

調整するためのパラメータは、中心部 5 1 0 1 a の屈折率 n_{max} 及び y 方向の厚さ d である。なお、中心部 5 1 0 1 a の屈折率 n_{max} 及び y 方向の厚さ d を変化させることにより、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率 n_0 を変化させることができる。調整ができないときは、屈折率分布定数 g を変化させて、再び (数 1 2) により伝送長 L を決定する。この最適化設計を繰り返すことにより、所望のシート状光伝送路 5 1 0 1 を得ることができる。

以上のように、実施の形態 1 5 に係る光デバイスは、光路 A と光路 B との間の光学的な光路長の差は、信号光の波長 λ の自然数倍となっている。したがって、光路 A と光路 B との間の位相差は、光伝送路へ入射する前と光伝送路から出射した後とで等しい。このため、実施の形態 1 5 に係

る光デバイスは、光伝送路に入射した際の波形と、出射する際の波形とを一致させることができ、光伝送路から信号光を損失なく出射することができる。

また、実施の形態 15 の係る光デバイスは、光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸が、いずれも z 方向と直交するので、外部と光伝送路とを簡単に結合することができる。特に、光伝送路へ入射する信号光を発光する発光素子や光伝送路から出射した信号光を受光する受光素子などの光部品と、光伝送路とを結合する際に、光部品を簡単に実装できる。

また、実施の形態 15 に係る光デバイスは、光路 A 及び光路 B は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を 2 個含み、2 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和が、信号光の波長の自然数倍に等しい。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

また、実施の形態 15 に係る光デバイスは、 y 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路を含み、シート状伝送路が y 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有している。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制し、信号光を伝送することができる。

また、実施の形態 15 に係る光デバイスは、シート状光伝送路が、 z 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、 z 方向へ折り曲げるための反射面 5102 と、 z 方向に伝送した信号光の光軸を、 z 方向と平行でない方向

へ折り曲げるための反射面 5 1 0 3 とを含んでいる。この場合、反射面 5 1 0 2 と反射面 1 0 3 とは、光路長差発生部である。

この構成により、 z 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、 z 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

また、実施の形態 1 5 に係る光デバイスは、シート状光伝送路において、反射面 5 1 0 2 により信号光のすべてが z 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが反射面 5 1 0 3 に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の j 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

(実施の形態 1 6)

次に、本発明の実施の形態 1 6 を説明する。実施の形態 1 6 では実施の形態 1 5 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 1 6 のマルチモード干渉二分岐器 5 2 0 0 は、図 3 6 に示したマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 と概略等しい構成を備えており、シート状光伝送路 5 2 0 1 の構成のみが異なる。

図 3 9 は、本発明の実施の形態 1 6 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 2 0 0 の信号光が伝送される部分の断面図である。図 3 9 は、マルチモード干渉二分岐器 5 2 0 0 を

、図 3 6 及び図 3 7 に示した実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 の場合と同一の場所で切断した断面図である。図 3 9 において、入射部 5 1 0 4 と、出射部 5 1 0 5 と、反射面 5 1 0 2 と、反射面 5 1 0 3 とは、すべて実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 と等しい構成を持つ。

シート状光伝送路 5 2 0 1 は、y 方向に屈折率分布を持つ。シート状光伝送路 5 2 0 1 は、中心部 5 1 0 1 a が最大屈折率 n_{\max} である。シート状光伝送路 5 2 0 1 は、中心部 5 1 0 1 a を対称面として、(数 9) を満足する屈折率分布を持つ。また、シート状光伝送路 5 2 0 1 は、y 方向にのみ屈折率分布を持ち、他の方向には屈折率分布を持たない。また、シート状光伝送路 5 2 0 1 の伝送長 L は、以下の (数 1 5) を満足している。

$$L = \frac{2\pi}{g}(j+0.5) \quad (j=0,1,2,\dots) \quad (\text{数 1 5})$$

(数 1 5) は、伝送長 L が、シート状光伝送路 5 2 0 1 で光が伝送する際の蛇行周期の (整数 + 0.5) 倍であることを意味している。伝送長 L が、(数 1 5) を満足している場合、光路 A 及び光路 B の蛇行周期が、入射時と比較して半周期だけずれる。

光路 A は、反射面 5 1 0 2 の最も入射部 5 1 0 4 から遠い側で反射して、z 方向の正の方向に折り曲げられ伝送された後、反射面 5 1 0 3 の最も出射部 5 1 0 5 に近い側で反射する。同様に、光路 B は、反射面 5 1 0 2 の最も入射部 5 1 0 4 から近い側で反射して、z 方向の正の方向に折

り曲げられ伝送された後、反射面 5 1 0 3 の最も出射部 5 1 0 5 から遠い側で反射する。

ここで、物理的な光路長 L_{1A} と、 L_{2A} と、 L_{1B} と、 L_{2B} とを実施の形態 1 5 の場合と等しく定義する。また、伝送長 L も実施の形態 1 5 の場合と等しく定義する。実施の形態 1 6 の場合、光路 A の物理的な光路長 L_{1A} に対応する光学的な光路長は、光路 B の物理的な光路長 L_{2B} に対応する光学的な光路長と等しい。また、光路 A の物理的な光路長 L_{2A} に対応する光学的な光路長は、光路 B の物理的な光路長 L_{1B} に対応する光学的な光路長と等しい。

一方、屈折率分布によって、光路 A の物理的な伝送長 L に対応する光学的な光路長は、光路 B の物理的な伝送長に対応する光学的な光路長と等しい。したがって、シート状光伝送路 5 2 0 1 の全体の光路 A 及び光路 B の間の光学的な光路長の差は、ゼロとなる。実施の形態 1 5 の場合と同様に、光学的な光路長を ΔL_{total} とすると、以下の（数 1 6）が成り立つ。

$$\Delta L_{total} = 0 \quad (\text{数 1 6})$$

すなわち、光路 A の光学的な光路長と、光路 B の光学的な光路長の間差は、ゼロとなる。光学的な光路長の差がゼロであるから、光路 A 及び光路 B の間には位相差は発生しない。このように、光路 A と光路 B との間差は、シート状伝送路 5 2 0 1 の伝送長 L を（数 1 5）を満足するように設定すると、ゼロになる。

以上のように、実施の形態 1 6 に係る光デバイスは、光

路 A と光路 B との間の光学的な光路長の差は、ゼロである。したがって、光路 A と光路 B との間の位相差は、光伝送路へ入射する前と光伝送路から出射した後とで等しい。このため、実施の形態 16 に係る光デバイスは、光伝送路に入射した際の波形と、出射する際の波形とを一致させることができ、光伝送路から信号光を損失なく出射することができる。

また、実施の形態 16 の係る光デバイスは、光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸が、いずれも z 方向と直交するので、外部と光伝送路とを簡単に結合することができる。特に、光伝送路へ入射する信号光を発光する発光素子や光伝送路から出射した信号光を受光する受光素子などの光部品と、光伝送路とを結合する際に、光部品を簡単に実装できる。

また、実施の形態 16 に係る光デバイスは、光路 A 及び光路 B は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を 2 個含み、2 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和が、ゼロである。この構成により、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

また、実施の形態 16 に係る光デバイスは、 y 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路を含み、シート状伝送路が y 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有している。この構成により、屈折率分布によってモード分散を抑制し、信号光を伝送することができる。

また、実施の形態 16 に係る光デバイスは、シート状光伝送路が、 z 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、 z 方向へ折り曲げるための反射面 5102 と、 z 方向に伝送した信号光の光軸を、 z 方向と平行でない方向へ折り曲げるための反射面 5103 とを含んでいる。さらに、反射面 5102 と反射面 5103 とは、光路長差発生部である。

この構成により、 z 方向と平行でない方向から光伝送路へ入射される信号光を、簡単に光伝送路へ入射させることができる。また、 z 方向と平行でない方向へ光伝送路から出射される信号光を、簡単に光伝送路から出射させることができる。

また、実施の形態 16 に係る光デバイスは、シート状光伝送路において、反射面 5102 により信号光のすべてが z 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが反射面 5103 に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。この構成により、信号光は入射側と出射側とで強度分布が一致する。

(実施の形態 17)

次に、本発明の実施の形態 17 を説明する。実施の形態 17 では実施の形態 15 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 17 のマルチモード干渉二分岐器 5300 は、図 36 に示したマルチモード干渉二分岐器 5100 と概略等しい構成を備えており、入

射部 5 3 0 4 と、出射部 5 3 0 5 と、シート状光伝送路 5 3 0 1 との構成が異なる。

図 4 0 は、本発明の実施の形態 1 7 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 3 0 0 の信号光が伝送される部分の断面図である。図 4 0 は、マルチモード干渉二分岐器 5 3 0 0 を、図 3 6 及び図 3 7 に示した実施の形態 1 5 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 の場合と同一の場所で切断した断面図である。

シート状光伝送路 5 3 0 1 は、 y 方向に屈折率分布を持つ。シート状光伝送路 5 3 0 1 は、中心部 5 1 0 1 a が最大屈折率 n_{\max} である。シート状光伝送路 5 3 0 1 は、中心部 5 1 0 1 a を対称面として、(1) 式を満足する屈折率分布を持つ。また、シート状光伝送路 5 3 0 1 は、 y 方向にのみ屈折率分布を持ち、他の方向には屈折率分布を持たない。

シート状光伝送路 5 3 0 1 において、入射部 5 3 0 4 から入射する信号光は、反射面 5 1 0 2 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光される。すなわち、入射部 5 3 0 4 の y 方向の長さを適切に設定することにより、信号光を、反射面 5 1 0 2 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光することができる。

また、シート状光伝送路 5 3 0 1 において、出射部 5 3 0 5 から出射する信号光は、反射面 5 1 0 3 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光された後、出射部 5 1 0 5 から出射する。すなわち、出

射部 5 3 0 5 の y 方向の長さを適切に設定することにより、信号光を、反射面 5 1 0 3 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、x 方向に平行な線状に集光することができる。

さらに、シート状光伝送路 5 3 0 1 は、このとき、シート状光伝送路 5 3 0 1 の反射面 5 1 0 2 から反射面 5 1 0 3 までの中心部 5 1 0 1 a における物理的な光路長 L_{R-R} は、以下の（数 1 7）の関係を満足している。

$$L_{R-R} = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{j}{2} \quad (j=0,1,2,3...) \quad (\text{数 1 7})$$

（数 1 7）は、物理的な光路長 L_{R-R} が、シート状光伝送路 5 3 0 1 内を蛇行する信号光の光路の蛇行周期の半整数倍と等しいことを意味している。（数 1 7）を満足するように、物理的な光路長 L_{R-R} を設定すると、反射面 5 1 0 2 上で x 方向に平行な線状に集光した信号光は、反射面 5 1 0 3 上に x 方向に平行な線状に再び集光する。

したがって、反射面 5 1 0 1 と反射面 5 1 0 2 との間には、y z 平面に平行な面内で光学的には共役関係が成立する。このとき、光路 A が感じる屈折率は、光路 B が感じる屈折率は完全に一致するので、光路 A 及び光路 B の間には、位相差は発生しない。このように、光路 A と光路 B との間の位相差は、シート状伝送路 5 3 0 1 の物理的な光路長 L_{R-R} を、（数 1 7）を満足するように設定すると、ゼロになる。

以上のように、実施の形態 1 7 に係る光デバイスは、シート状光伝送路 5 3 0 1 を伝送される複数の光路のうち、

光路 A と光路 B との間の光学的な光路長の差は、ゼロとなっている。光路 A と光路 B との間の位相差は、光伝送路へ入射する前と光伝送路から出射した後とで等しい。このため、実施の形態 17 に係る光デバイスは、光伝送路に入射した際の波形と、出射する際の波形とを一致させることができ、光伝送路から信号光を損失なく出射することができる。

また、実施の形態 17 に係る光デバイスは、光路 A 及び光路 B は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない。この構成により、光路 A 及び B の位相差をゼロにすることができる。

また、実施の形態 17 に係る光デバイスは、上述のシート状光伝送路が、反射面 5102 と反射面 5103 とを含み、中心部 101a における反射面 102 と反射面 103 との間の物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $j/2$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい。また、実施の形態 17 の光デバイスは、信号光が、光伝送路の第 1 方向の厚さが半分となる中心部で、y 方向及び z 方向に共に直交する x 方向に平行な線状に集光される。

この構成により、中心部における反射面間が、光学的に共役関係となる。このため、反射面間で、二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない。したがって、二つの光路の位相差をゼロにすることができる。

(実施の形態 18)

次に、本発明の実施の形態 18 を説明する。実施の形態

18では実施の形態15と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態18のマルチモード干渉二分岐器5400は、図36に示したマルチモード干渉二分岐器5100と概略等しい構成を備えており、入射部5404と、出射部5405及び出射部5406と、シート状光伝送路5401との構成が異なる。

図41Aは、本発明の実施の形態18に係るマルチモード干渉二分岐器5400の信号光が伝送される部分の断面図である。図41Aは、マルチモード干渉二分岐器5400を、図36及び図37に示した実施の形態15に係るマルチモード干渉二分岐器5100の場合と同一の場所で切断した断面図である。なお、図中、屈折率分布は省略している。

シート状光伝送路5401は、外部から入射した信号光をy方向に閉じこめ、z方向（伝送方向）に伝送可能である。シート状光伝送路5401は、z方向の両端に反射面5402及び反射面5403を持つ。

入射部5404は、シート状光伝送路5401へ入射する信号光の光軸が、z方向と平行でなく、所定の鋭角をなすように構成される。また、出射部5405は、シート状光伝送路5401から出射する信号光の光軸が、z方向と平行でなく、所定の鋭角をなすように構成される。

反射面5402は、入射部5405を伝送しz方向と所定の鈍角をなす方向からシート状光伝送路5401へ入射する信号光の光軸をz方向に折り曲げるよう配置されている。反射面5403は、シート状光伝送路5401を伝送

し z 方向と所定の鈍角をなす方向へ信号光を折り曲げるよう配置されている。

シート状光伝送路 5 4 0 1 において、入射部 5 4 0 4 から入射する信号光は、反射面 5 4 0 2 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、x 方向に平行な線状に集光される。すなわち、入射部 5 4 0 4 の構成を適切に設定することにより、信号光を、反射面 5 4 0 2 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、x 方向に平行な線状に集光することができる。

また、シート状光伝送路 5 4 0 1 において、出射部 5 4 0 5 から出射する信号光は、反射面 5 4 0 3 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、x 方向に平行な線状に集光された後、出射部 5 4 0 5 から出射する。すなわち、出射部 5 4 0 5 の構成を適切に設定することにより、信号光を、反射面 5 4 0 3 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、x 方向に平行な線状に集光することができる。

このように、実施の形態 1 8 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 4 0 0 は、光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸が、いずれも z 方向と平行でなく、所定の鋭角をなしている。したがって、発光素子 5 1 1 1 と受光素子 5 1 1 2 との配置レイアウトの自由度を向上させることができる。

なお、実施の形態 1 8 において、実施の形態 1 5 及び実施の形態 1 6 で説明したように、シート状光伝送路 5 4 0 1 の信号光の光路 A と光路 B との位相差を計算し、その位相差を信号光の波長の自然数倍やゼロとしてもよい。この

ようにしても、光路 A と光路 B との位相差をゼロにすることができる。

(実施の形態 19)

次に、本発明の実施の形態 19 を説明する。実施の形態 19 では実施の形態 15 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 19 のマルチモード干渉二分岐器 5500 は、図 36 に示したマルチモード干渉二分岐器 5100 と概略等しい構成を備えており、入射部 5504 と、出射部 5505 及び出射部 5506 と、シート状光伝送路 5501 との構成が異なる。

図 41B は、本発明の実施の形態 19 に係るマルチモード干渉二分岐器 500 の信号光が伝送される部分の断面図である。図 41B は、マルチモード干渉二分岐器 5500 を、図 1 及び図 2 に示した実施の形態 15 に係るマルチモード干渉二分岐器 5100 の場合と同一の場所で切断した断面図である。なお、図中、屈折率分布は省略している。

シート状光伝送路 5501 は、外部から入射した信号光を y 方向に閉じこめ、z 方向（伝送方向）に伝送可能である。シート状光伝送路 5501 は、z 方向の両端に反射面 5502 及び反射面 5503 を持つ。

入射部 5504 は、シート状光伝送路 5401 へ入射する信号光の光軸が、z 方向と平行でなく、所定の鈍角をなすように構成される。また、出射部 5505 は、シート状光伝送路 5501 から出射する信号光の光軸が、z 方向と平行でなく、所定の鈍角をなすように構成される。

反射面 5502 は、入射部 5504 を伝送し z 方向と所

定の鈍角をなす方向からシート状光伝送路 5 5 0 1 へ入射する信号光の光軸を z 方向に折り曲げるよう配置されている。反射面 5 5 0 3 は、シート状光伝送路 5 5 0 1 を伝送し z 方向と所定の鈍角をなす方向へ信号光を折り曲げるよう配置されている。

シート状光伝送路 5 5 0 1 において、入射部 5 5 0 4 から入射する信号光は、反射面 5 5 0 2 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光される。すなわち、入射部 5 5 0 4 の構成を適切に設定することにより、信号光を、反射面 5 5 0 2 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光することができる。

また、シート状光伝送路 5 5 0 1 において、出射部 5 5 0 5 から出射する信号光は、反射面 5 5 0 3 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光された後、出射部 5 5 0 5 から出射する。すなわち、出射部 5 5 0 5 の構成を適切に設定することにより、信号光を、反射面 5 5 0 3 上の、シート光伝送路の中心部 5 1 0 1 a で、 x 方向に平行な線状に集光することができる。

シート状光伝送路 5 5 0 1 は、このとき実施の形態 1 7 において説明した（数 1 7）を満足している。したがって、反射面 5 5 0 2 と反射面 5 5 0 3 との間には、 yz 平面に平行な面内で光学的には共役関係が成立する。このとき、光路 A が感じる屈折率は、光路 B が感じる屈折率は完全に一致するので、光路 A 及び光路 B の間には、位相差は発生しない。

このように、実施の形態 19 に係るマルチモード干渉二分岐器 5500 は、光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸が、いずれも z 方向と平行でなく、所定の鈍角をなしている。したがって、発光素子 5111 と受光素子 5112 との配置レイアウトの自由度を向上させることができる。

なお、実施の形態 19 において、実施の形態 15 及び実施の形態 16 で説明したように、シート状光伝送路 5501 の信号光の光路 A と光路 B との位相差を計算し、その位相差を信号光の波長の自然数倍やゼロとしてもよい。このようにしても、光路 A と光路 B との位相差をゼロにすることができる。

（実施の形態 20）

図 42A は、本発明の実施の形態 20 に係るマルチモード干渉二分岐器 5600 の信号光が伝送される部分の断面図である。実施の形態 20 では実施の形態 15 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 20 に係るマルチモード干渉二分岐器 5600 は、図 36 に示したマルチモード干渉二分岐器 100 と概略等しい構成を備えており、出射部に相当する構成を備えていない点のみ相違する。なお、図中、屈折率分布は省略している。

図 42A において、実施の形態 20 に係るマルチモード干渉二分岐器 5600 は、入射部 5104 と、シート状光伝送路 5601 とを備える。シート状光伝送路 5601 は、入射側の構成は、実施の形態 1 に係るシート状光伝送路

5 1 0 1 と等しい。一方、出射側において、信号光は、出射側からシート状光伝送路 5 6 0 1 の端面から z 方向に出射される。

シート状光伝送路 5 6 0 1 において、光路長差発生部は反射面 5 1 0 2 しかない。よって、反射面 5 1 0 2 において発生した光路 A と光路 B との位相差を、信号光の波長の整数倍とすることにより、位相差をゼロにすることができる。

(実施の形態 2 1)

図 4 2 B は、本発明の実施の形態 2 1 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 7 0 0 の信号光が伝送される部分の断面図である。実施の形態 2 1 では実施の形態 1 5 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 2 1 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 7 0 0 は、図 1 に示したマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 と概略等しい構成を備えており、入射部に相当する構成を備えていない点のみ相違する。なお、図中、屈折率分布は省略している。

図 4 2 B において、実施の形態 2 1 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 7 0 0 は、入射部 5 1 0 4 と、シート状光伝送路 5 7 0 1 とを備える。シート状光伝送路 5 7 0 1 は、出射側の構成は、実施の形態 1 5 に係るシート状光伝送路 5 1 0 1 と等しい。一方、入射側において、信号光は、入射側からシート状光伝送路 5 7 0 1 の端面から z 方向に入射される。

シート状光伝送路 5 7 0 1 において、光路長差発生部は

反射面 5 1 0 3 しかない。よって、反射面 5 1 0 3 において発生した光路 A と光路 B との位相差を、信号光の波長の整数倍とすることにより、位相差をゼロにすることができる。

(実施の形態 2 2)

次に、図 4 3 A を参照して本発明の実施の形態 2 2 を説明する。実施の形態 2 2 では実施の形態 1 5 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 2 2 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 8 0 0 は、図 3 6 に示したマルチモード干渉二分岐器 5 1 0 0 と概略等しい構成を備えており、出射部に相当する構成がない点及び中間入出射部が存在する点が異なる。なお、図中、屈折率分布は省略している。

実施の形態 2 2 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 8 0 0 は、入射部 5 1 0 4 と、シート状光伝送路 5 8 0 1 と、中間入出射部 5 8 2 0 とを備える。シート状光伝送路 5 8 0 1 は、入射側の構成は、第 1 実施の形態に係るシート状光伝送路 5 1 0 1 と等しい。一方、出射側において、信号光は、出射側からシート状光伝送路 5 8 0 1 の端面から z 方向に出射される。

中間入出射部 5 8 2 0 は、反射面 5 8 1 3 と、中間出射部 5 8 1 4 と、処理部 5 8 1 6 と、中間入射部 5 8 1 7 と、反射面 5 8 1 9 と、を含む。

反射面 5 8 1 3 は、 z 方向の正方向に沿って伝送する信号光を y 方向の負方向へ折り曲げるように、 $z-x$ 平面に対して 54.5° の角度をなす反射面である。

中間出射部 5 8 1 4 は、x 方向に伸びた三角柱形状の均質媒質のプリズムである。中間出射部 5 8 1 4 は、y 方向の負方向へ折り曲げられた信号光の光軸を、z 方向の正方向へ折り曲げる反射面 5 8 1 5 を有する。

処理部 5 8 1 6 は、入射した信号光を光学フィルタで処理する。例えば、偏光フィルタや半波長板や $1/4$ 波長板や ND フィルタ等である。また、液晶素子を配置してもよい。この場合、光学スイッチとして機能する。

中間入射部 5 8 1 7 は、x 方向に伸びた三角柱形状の均質媒質のプリズムである。中間入射部 5 8 1 7 は、z 方向に伝送される信号光を y 方向の正方向へ折り曲げる反射面 5 8 1 8 を有する。

反射面 5 8 1 9 は、y 方向の正方向に沿って入射する信号光を、z 方向の正方向へ折り曲げるように、zx 平面に対して 45° の角度をなす反射面である。

以上の構成において、発光点 5 1 1 0 a から発振した信号光は、実施の形態 1 5 と同様に伝送されて反射面 5 8 1 3 に至る。信号光の光軸は、反射面 5 8 1 3 で y 方向の負方向へ折り曲げられる。さらに中間出射部 5 8 1 4 の反射面 5 8 1 5 で反射して、z 方向の正方向へ折り曲げられる。z 方向の正方向へ折り曲げられた信号光の光軸は、処理部 5 8 1 6 で所定の処理を受け、中間入射部 5 8 1 7 の反射面 5 8 1 8 で反射して、y 方向の正方向へ折り曲げられる。y 方向の正方向へ折り曲げられた信号光の光軸は、反射面 5 8 1 9 により z 方向の正方向に折り曲げられる。信号光は、最後にシート状光伝送路の端部から出射される。

シート状光伝送路 5 8 0 1 において、光路長差発生部は反射面 5 1 0 2 と、反射面 5 8 1 3 と、反射面 5 8 1 9 の 3 面である。よって、3 面の反射面で発生する光路 A と光路 B との光学的な光路長差の和を、信号光の波長の整数倍とすることにより、光路 A と光路 B と全体の位相差をゼロにすることができる。

また、3 面の反射面で発生する光路 A と光路 B との光学的な光路長差の和を、ゼロにすることにより、光路 A と光路 B との全体の位相差をゼロにすることができる。

(実施の形態 2 3)

次に、図 4 3 B を参照して本発明の実施の形態 2 3 を説明する。実施の形態 2 3 では実施の形態 1 5 及び前述の実施の形態 2 2 と同一部分については説明を省略し、相違部分のみ説明する。実施の形態 2 3 に係るマルチモード干渉二分岐器 5 9 0 0 は、図 4 3 A に示したマルチモード干渉二分岐器 5 8 0 0 と概略等しい構成を備えており、出射部 5 1 0 5 が実施の形態 1 5 と等しい点異なる。なお、図中、屈折率分布は省略している。

シート状光伝送路 5 9 0 1 において、光路長差発生部は反射面 5 1 0 3 と、反射面 5 8 1 3 と、反射面 5 8 1 9 と、反射面 5 1 0 3 との 4 面である。よって、4 面の反射面で発生する光路 A と光路 B との光学的な光路長差の和を、信号光の波長の整数倍とすることにより、光路 A と光路 B と全体の位相差をゼロにすることができる。

また、4 面の反射面で発生する光路 A と光路 B との光学的な光路長差の和を、ゼロにすることにより、光路 A と光

路 B との全体の位相差をゼロにすることができる。

(他の実施の形態)

実施の形態 1 5 乃至 2 3 は、上述の形態に限られず適宜変更することができる。例えば、位相差を発生させる部分は、各実施の形態では反射面であったが、光路長差を求めることが可能であれば他の構成でもよい。

また、各実施の形態では、発光素子 5 1 1 0 は、面発光レーザであったが、端面発光レーザ等の他の素子でもよい。また、発光素子 5 1 1 0 の発光点 5 1 1 0 a の位置に、外部の光源から発振した信号光を伝送した他の光伝送路の出射部を配置してもよい。

また、各実施の形態では、受光素子 5 1 1 1 及び受光素子 5 1 1 2 は、フォトダイオードであったが、フォトトランジスタ等の他の素子でもよい。また、受光素子 5 1 1 1 の受光点 5 1 1 2 a 及び受光素子の受光点 5 1 1 2 a の位置に、信号光を伝送するための他の光伝送路の入射部を配置してもよい。

また、各実施の形態では、屈折率分布は中心屈折率が最大（最大屈折率 n_{\max} ）であり中心から周辺方向に離れるにしたがって連続的かつ中心対称に屈折率が低下していく屈折率分布であったが、これに限られない。例えば、中心部から階段状にステップ関数的に低下する屈折率分布でもよい。

さらに、各実施の形態では、シート状光伝送路の y 方向以外の方向は、各実施の形態ではマルチモード干渉を発生させるため一定屈折率であったが、光データバスシートな

どの場合は x 方向に信号光を閉じこめるために所望の屈折率分布を持っていたてもよい。また、光学的な光路長差が発生する光路長差発生部は、任意の数でよい。

例えば、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を m 個 ($m = 1, 2, 3 \dots$) 含み、 m 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和を、信号光の波長の自然数倍に等しくしてよい。

また、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、 n 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和を、ゼロとしてよい。

また、実施の形態 1 及び 2 では、入射部からシート状光伝送路へは平行光入射するよう構成されているが、発散光あるいは収束光入射でもよく、信号光のシート状光伝送路の中心部に対する対称性が存在すればよい。

以上のように、各実施の形態の光デバイスは、以下の構成を備えている。

(1) 第 1 方向 (上記では y 方向) に屈折率分布を含み、信号光を複数の光路によって当該第 1 方向に直交する第 2 方向 (上記では z 方向) に伝送可能な光伝送路を備える。

(2) 光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸の内、少なくとも一方は、第 2 方向と平行でない。

(3) 複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に光伝送路へ入射する二つの光路は、光伝送路へ入射する位相差と光伝送路から出射する位相差とが等しい。

各実施の形態に係る光デバイスは、(1) の構成を備え

ているので、光伝送路が屈折率分布を備えているため、光伝送路を伝送される信号光にモード分散が抑制される。したがって、伝送される信号光の波形のくずれが発生せず、ギガビットクラスの高周波の信号光をマルチモードで伝送することが可能である。

また、各実施の形態に係る光デバイスは、(2)の構成を備えているため、入射部及び出射部は、非平行入射部として機能する。したがって、レーザやセンサーなどの光部品を実装する際に、光部品と光伝送路との間の高さを調整が容易である。この結果、これらの光部品を簡単に実装することができる。また、直接電気用基板上に実装が可能となるため、光デバイスをコンパクトにできる。

また、各実施の形態に係る光デバイスは、(3)の構成を備えているので、二つの光路を伝送される光線は、光伝送路から出射する際に損失なく結合される。

特に、各実施の形態に係る光デバイスのように、光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び光伝送路から出射する信号光の光軸の内、少なくとも一方が、第2方向と直交する場合、外部と光伝送路とを簡単に結合することができる。例えば、光伝送路へ入射する信号光を発光する発光素子や光伝送路から出射した信号光を受光する受光素子などの光部品と、光伝送路とを結合する際に、光部品を簡単に実装できる。

(マルチモード干渉のセルフイメージング原理)

次に、各実施の形態で説明した光学的な光路長差を補償する構成と、マルチモード干渉のセルフイメージング原

理によって信号光を分岐するために必要なシート状光伝送路の物理的な光路長との関係について説明する。ここでは簡単のために、実施の形態 15 の光デバイスにおいて、セルフイメージング原理を用いて光を二分岐させる場合を例として説明する。

図 44 は、実施の形態 15 に係るマルチモード干渉二分岐器 5100 の構成を表す斜視図である。図 45 は、実施の形態 15 に係るシート状光伝送路 5101 の部分断面図である。図 45 は、図 44 に図示した C-D-G-H 面を表している。なお、図 44 及び図 45 において、詳細な構成は、実施の形態 15 で説明したので省略し、新たに説明が必要になる部分のみ説明する。

図 44 及び図 45 において、セルフイメージング原理に基づく z 方向の物理的な光路長を L_1 とする。また、シート状光伝送路 5101 の反射面 5102 から反射面 5103 までの中心部 5101a における物理的な光路長を L_2 とする。

図 45 において、シート状光伝送路 5101 は、 zx 平面に平行な面内で屈折率は一定である。したがって、信号光の光路の内、中心部 5101a に入射する光路 O は、屈折率分布の影響を受けることなく直進する。光路 O は、直進する間に感じる屈折率は一定である。一方、光路 A は、屈折率が伝送方向へ進行するに従って刻々変化する。そこで、マルチモード干渉の説明に際しては、これら二つの光路を分けて説明することとする。

中心部 5101a に入射する光路 O 上を伝送される信号

光は、一定の実効屈折率 n_0 の平面内を伝送される。したがって、セルフイメージング原理の適用して L_1 を計算することができる。セルフイメージング原理によれば、以下の（数 1 8）に示す L_π を単位して周期的に伝送される信号光が入射する信号光と同一の形状に戻ることが知られている。

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \quad (\text{数 1 8})$$

入射する信号光の挙動は、信号光が伝送路に入射した x 方向の位置に応じて、セルフイメージング原理の計算を行うことができる。例えば、実施の形態 1 5 のように、 x 方向の中心位置に入射した信号光は、 $3/4 L_\pi$ を周期として同一の波形が得られることが知られている。

$$\frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} = \frac{4n_0 W^2}{3\lambda} \quad (\text{数 1 9})$$

ここで、 n_0 は中心部の最大屈折率 n_{\max} に対応する幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率、 W はシート型光伝送路の x 方向の大きさ、 λ は伝送される信号光の波長である。

このように、セルフイメージング原理は、シート状光伝送路の伝送路長が、基本モードと 1 次モードの差の関数となることに特徴がある。また、セルフイメージング原理は、基本モードと 1 次モードの差が、近似的に信号光の波長 λ と、実効屈折率 n_0 と、幅方向の大きさ W とで決定されることに特徴がある。

また、セルフイメージング原理によれば、 x 方向の中

心位置に入射した信号光が x 方向の中心位置を通り y z 面に平行な面に対して対称に N 等分に分岐して集光される位置は、同一の出力波形となる位置から z 方向に $(1/N)$ $3/4 L_{\pi}$ だけずれた位置になることが知られている。

以上より、シート状光伝送路 5 1 0 1 の x 方向の大きさ W の中心位置に入射した信号光が、x 方向の中心位置を通り y z 面に平行な面に対して対称に N 個に分岐して集光されるためには、物理的な光路長 L_1 が、以下の (数 2 0) を満足することが必要である。

$$L_1 = p * \frac{4}{3} L_{\pi} \pm \frac{1}{N} * \frac{4}{3} L_{\pi} = \left(p \pm \frac{1}{N} \right) \frac{4}{3} L_{\pi} = \left(p \pm \frac{1}{N} \right) \frac{n_0 W^2}{\lambda} \quad (\text{数 2 0})$$

ただし、 p ($p \geq 0$)、 N ($N \geq 1$) はともに整数で、 L_1 は正の数であるから $(p \pm 1/N)$ が正の数となる関係を満足する。

分岐数が 2 の場合 ($N = 2$ である場合) を計算すると、(数 2 0) を変形して以下の (数 2 1) を得る。

$$L_1 = \left(p \pm \frac{1}{2} \right) \frac{n_0 W^2}{\lambda} = (2p+1) \frac{n_0 W^2}{2\lambda} \quad (p = 0, 1, 2, \dots) \quad (\text{数 2 1})$$

(数 2 1) からわかるように、実施の形態 1 5 の場合、 $n_0 W^2 / (2\lambda)$ を単位としその奇数倍 (1, 3, 5, ...) の周期に対応した位置に出射部を設けることにより、信号光を分岐することができる。

一方、中心部から離れた位置に入射する光路 A は、屈折率分布の影響を受けシート状光伝送路 5 1 0 1 内を蛇行しながら伝送する。したがって、光路 A 上を伝送される信号光が感じる屈折率は均一ではない。

光路 A において、中心部 5 1 0 1 a から離れる方向に進む場合、常に屈折率が高い方から小さい方へ進行するため、次第に y 方向とのなす角が大きくなる方向に進行する。すなわち、光路 A は、中心部 5 1 0 1 a から離れる方向に進む場合、中心部 5 1 0 1 a から離れるに従って z 方向に平行となるように近づいていく。

逆に、光路 A において、中心部 5 1 0 1 a へ近づく方向に進む場合、常に屈折率が小さい方から大きい方へ進行するため、次第に y 方向とのなす角が小さくなる方向に進行する。すなわち、光路 A は、中心部 5 1 0 1 a へ近づく方向に進む場合、中心部 5 1 0 1 a へ近づくに従って z 方向に垂直となるように近づいていく。この作用を繰り返すことにより、光路 A は、蛇行しながら進行する。

このように、光路 A の信号光は常に y 方向と有限の角度をなして進行していくことになる。この結果、光路 A を伝送される信号光の速度は、中心部 5 1 0 1 a から離れる方向に進む場合、増大していく。逆に、光路 A を伝送される信号光の速度は、中心部 5 1 0 1 a へ近づく向に進む場合、減少していく。

シート状光伝送路 5 1 0 1 の屈折率分布は、前述の（数 9）を満足する二次関数で表されている。屈折率分布を適切に設定することにより、光路 A の z 方向の速度成分は、光路 O の z 方向の速度成分と等しくなる。

z 方向の光の速度成分が一定であることは、z 方向に位相の乱れがないことを意味する。したがって、光路 A を伝送される信号光は、（数 2 1）を満足するようにシート状

光伝送路 5 1 0 1 を構成した場合、光路 O を伝送される信号光と同様に振る舞う。

このように、光路 A の伝送される信号光は、物理的な光路長 L_1 が (数 2 1) を満足する限り、セルフイメージング原理により x 方向に二分岐されて集光される。このため、(数 2 1) に基づいて計算された集光位置に出射部を設けることにより、信号光を二分岐させて出射させることができる。

しかしながら、入射する信号光と出射する信号光の強度分布を完全に整合させるためには、先に説明した反射面 5 1 0 2 及び反射面 5 1 0 3 で発生する位相差がゼロとなるように構成する必要がある。

位相差がゼロとなるシート状光伝送路 5 1 0 1 の物理的な光路長は、(数 1 2) で求めたとおりである。(数 1 2) の条件から L_2 を求めると、(数 1 2) に d だけ加えた以下の (数 2 2) が得られる。

$$L_2 = \frac{2\pi}{g} j + d \quad (j = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (\text{数 2 2})$$

表 2 は、シート状光伝送路 5 1 0 1 において、マルチモード干渉のセルフイメージング原理により二分岐できる最短の物理的な光路長 L_1 と、反射面で発生した位相差を補償する最短の物理的な光路長 L_2 との関係を具体的に計算した結果を示す表である。ただし、屈折率 $n_0 = 1.5$ とし、波長 $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ とし、屈折率分布定数 g を $d/2$ で中心から 1% 程度低下するように設定している。また、 L_1 欄のうち、1 倍・2 倍とあるのは、出射部にお

いてシート状光伝送路 5 1 0 1 の y 方向の厚さ d のそれぞれ 1 倍・2 倍となるシート状光伝送路の x 方向の分離幅 W を表す。

表 2

		シート状光伝送路の Y 方向厚さ d [μ m]			
		50	100	200	1000
屈折率分布係数 g [m m ⁻¹]		5.6	2.8	1.414	0.28
反射面で発生した 位相差を補償する 最短の物理的な光 路長 L 2 [m m]		1.17	2.34	4.69	23.2
マルチモー ド干渉で二 分岐できる 最短の物理 的な光路長 L 1 [m m]	1 倍	8.8	35.3	141	352
	2 倍	35.2	141	565	14118

表 2 からわかるように、光路長 L 2 と光路長 L 1 とを、同時に満足するためには、L 2 の整数倍であって L 1 の奇数倍となるような値を、シート状光伝送路 5 1 0 1 に採用すればよい。

しかしながら、両者を完全に一致させることは困難である。そこで、伝送方向長さに対する許容幅が L 2 よりも広い L 1 を用いて微調整をすることが必要である。表 2 から理解されるように、L 2 は L 1 と比較してはるかに小さい値をとるので、両者を整合させるためには、L 2 を調整し

て L_1 とほぼ一致する物理的な光路長を採用するとよい。
例えば、 L_2 をほぼ 8 倍すれば、 x 方向に幅 d だけ二分岐
するために必要な L_1 を得る。

以上説明したように、実施の形態の光デバイスは、屈折
率分布に直交する方向から入射する信号光の位相差を補償
する物理的な光路長と、マルチモード干渉のセルフイメージ
ング原理の条件におけるセルフイメージング原理に
より分岐可能な物理的な光路長とが一致している。このた
め、入射した信号光をマルチモード干渉により二分岐して
出射する際に、入出射部分とシート状光伝送路とを損失な
く結合することができる。

以上の説明したように、実施の形態の光デバイスは、反
射面で発生した位相差を補償する物理的な光路長と、マル
チモード干渉のセルフイメージング原理の条件に基づく
物理的な光路長とが一致している。このため、入射した信
号光をマルチモード干渉により二分岐して出射する際に、
入出射部分とシート状光伝送路とを損失なく結合すること
ができる。

なお、以上の例では、シート状光伝送路 5101 の x 方
向の対称位置に二分岐させる例を示したが、本発明はこの
実施の形態に限定されない。

図 46A～D は、光デバイスの入出力構成の例を示す模
式図である。図 46A～D は、いずれも、光デバイスの z
 x 平面に平行な面からみた図である。

図 46A は、他の実施の形態のマルチモード干渉を利用
した光デバイスの模式図である。図 46A に記載した光デ

バイスは、一つの入射部 $I n p u t 1$ から入射した信号光を、マルチモード干渉により分岐して二つの出射部 $O u t p u t 1$ 及び出射部 $O u t p u t 2$ から出射する分岐器である。入射部 $I n p u t 1$ は、光デバイスの z 方向の中心位置から外れた位置に配置されている。出射部 $O u t p u t 1$ は、入射部 $I n p u t 1$ を通り z 軸に平行な線上に配置されている。出射部 $O u t p u t 2$ は、出射部 $O u t p u t 1$ と x 方向に間隔を空けて配置されている。

図 4 6 B は、他の実施の形態のマルチモード干渉を利用した光デバイスの模式図である。図 4 6 B に記載した光デバイスは、二つの入射部 $I n p u t 1$ 及び入射部 $I n p u t 2$ から入射した信号光を、マルチモード干渉により合成して一つの出射部 $O u t p u t 1$ から出射する合成器である。二つの入射部 $I n p u t 1$ 及び入射部 $I n p u t 2$ は、 x 方向の中心を通り z 軸に平行な線に関して対称に配置されている。出射部 $O u t p u t 1$ は、 x 方向の中心を通り z 軸に平行な線上に配置されている。

図 4 6 C は、他の実施の形態のマルチモード干渉を利用した光デバイスの模式図である。図 4 6 C に記載した光デバイスは、二つの入射部 $I n p u t 1$ 及び入射部 $I n p u t 2$ から入射した信号光を、マルチモード干渉により合成して一つの出射部 $O u t p u t 1$ から出射する合成器である。二つの入射部 $I n p u t 1$ 及び入射部 $I n p u t 2$ は、 x 方向の中心を通り z 軸に平行な線に関して対称に配置されている。出射部 $O u t p u t 1$ は、入射部 $I n p u t 1$ を通り z 軸に平行な線上に配置されている。

図 4 6 D は、他の実施の形態のマルチモード干渉を利用した光デバイスの模式図である。図 4 6 D に記載した光デバイスは、二つの入射部 $I n p u t 1$ 及び入射部 $I n p u t 2$ から入射した信号光を、マルチモード干渉により合成及び分岐して二つの出射部 $O u t p u t 1$ 及び出射部 $O u t p u t 2$ から出射する合成器である。二つの入射部 $I n p u t 1$ 及び入射部 $I n p u t 2$ は、 x 方向の中心を通り z 軸に平行な線に関して対称に配置されている。二つの出射部 $O u t p u t 1$ 及び出射部 $O u t p u t 2$ は、 x 方向の中心を通り z 軸に平行な線に関して対称に配置されている。

図 4 6 A ~ D に記載された光デバイスは、マルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件がそれぞれ異なる。そこで、マルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件を変更して、物理的な光路長とを調整するとよい。これにより、図 4 6 A ~ D に記載された光デバイスにおいて、反射面で発生した位相差を補償する物理的な光路長と、マルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件に基づく物理的な光路長とが一致する。この結果、入射した信号光をマルチモード干渉により二分岐して出射する際に、入出射部分とシート状光伝送路とを損失なく結合することができる。

さらに、上記光デバイスの入出射構成に限られず、シート状光伝送路へ信号光を入射するための M 個 ($M = 1, 2, 3 \dots$) の入射部と、シート状光伝送路から信号光を出射するための N 個 ($N = 1, 2, 3 \dots$) の出射部と

を備え、マルチモード干渉により入出射部を結合する光デバイスに適用可能である。

(1) 第1方向に屈折率分布を含み、信号光を第1方向に直交する第2方向に伝送可能であり、第1方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路

(2) 光伝送路へ信号光を入射するためのM個 ($M = 1, 2, 3 \dots$) の入射部

(3) 光伝送路から信号光を出射するためのN個 ($N = 1, 2, 3 \dots$) の出射部
を備えており、

(4) M個の入射部及びN個の出射部は、内部を伝送する信号光の光軸が前記第2方向と平行でない方向に前記シート状光伝送路と結合する少なくとも一つの非平行入出射部を含む。

(5) 非平行入出射部と対応する入射部又は出射部との間を伝送する信号光の複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称にシート状光伝送路へ入射する二つの光路は、シート状光伝送路へ入射する位相差と前記シート状光伝送路から出射する位相差とが等しい。

(6) M個の入射部及びN個の出射部は、すべて所定のマルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件を満足する位置に配置されている。

実施の形態に係るマルチモード干渉二分岐器は、(1)の構成を備えているので、光伝送路を伝送される信号光にモード分散が抑制される。したがって、伝送される信号光の波形のくずれが発生せず、ギガビットクラスの高周波の

信号光をマルチモードで伝送することが可能である。

また、実施の形態に係るマルチモード干渉二分岐器は、
(4)の構成を備えているため、レーザやセンサーなどの光部品を実装する際に、光部品と光伝送路との間の高さを調整が容易である。したがって、これらの光部品を簡単に実装することができる。また、直接電気用基板上に実装が可能となるため、光デバイスをコンパクトにできる。

また、実施の形態に係るマルチモード干渉二分岐器は、
(5)の構成を備えているので、二つの光路を伝送される光線は、光伝送路から出射する際に損失なく結合される。

また、実施の形態に係るマルチモード干渉二分岐器は、
(2)と(3)と(6)との構成を備えているので、入射部から入射した信号光は、マルチモード干渉により出射部から出射される。

(実施の形態 24)

図47Aは、本発明の実施の形態24に係る光2分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。実施の形態24に係る光デバイスは、図47Aに示すように、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路4701を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路4701は、図47Aに示すように、 xz 平面に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路4701は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有する。屈折率分布導波路4701は、幅方向には一定の屈折率を有し屈折率を持たない。屈折率分布スラブ導波

路 4 7 0 1 は、入出射面 4 7 0 2 と、反射面 4 7 0 3 とを備える。

入出射面 4 7 0 2 は、幅方向の中心位置に入射光 4 7 0 4 を入射させる入射部（図示せず）と、幅方向の中心に対して対称な位置から出射する出射光 4 7 0 5 を受光する受光部（図示せず）と、出射光 4 7 0 6 を受光する受光部（図示せず）とのすべてに対向する。また、反射面 4 7 0 3 は、端面にアルミニウム等の金属を蒸着してできた全反射面である。反射面 4 7 0 3 は、入射した信号光をすべて反射させる。

実施の形態 2 4 において、屈折率分布スラブ導波路 4 7 0 1 は、スラブ長 $L/2$ を、ほぼ $n_0 \times W_0^2 / (4\lambda)$ に一致させ、出射光 4 7 0 5 と、出射光 4 7 0 6 との間隔 D_1 を、ほぼ $W_0/2$ に一致させている。ただし、 n_0 は、幅方向に励起する 0 次モード光の実効屈折率である。

屈折率分布スラブ導波路 4 7 0 1 は、実施の形態 1 において説明した中心入射 2 分岐の光デバイスにおいて説明した屈折率分布導波路 1 0 1 の半分のスラブ長を持っている。したがって、入射部から屈折率分布スラブ導波路 4 7 0 1 へ入射した信号光は、 z 方向の正方向に伝搬して反射面 4 7 0 3 で反射し、 z 方向に負方向に伝搬することにより、実施の形態 1 において説明した光路と等しい長さを伝搬することになる。この結果、信号光は、マルチモード干渉のセルフイメージング原理に基づいて、出射光 4 7 0 5 と、出射光 4 7 0 6 との位置に入射光と同一のプロファイルを持つ像を形成する。形成された像は、それぞれ出射光

として出力される。

以上のように、実施の形態 2 4 に係る光デバイスによれば、幅方向の中心位置に入射した入射光を、幅方向の中心に対称に 2 分岐させる光分岐器を、実施の形態 1 の半分のスラブ長を持つ屈折率分布スラブ導波路により実現することができる。また、実施の形態 2 4 に係る光デバイスは、幅方向の中心位置に入射した入射光を、幅方向の中心に対称に 2 分岐した出射光として、入射した面と同一の面から出射させることができる。

図 4 7 B は、本発明の実施の形態 2 4 の変形例に係る光 2 分岐を行う光デバイスの屈折率分布スラブ導波路の概要を示す斜視図である。実施の形態 2 4 の変形例に係る光デバイスは、図 4 7 B に示すように、光を伝送する屈折率分布スラブ導波路 4 8 0 1 を中心に構成される。屈折率分布スラブ導波路 4 8 0 1 は、図 4 7 B に示すように、 xz 平面に広がるシート状のマルチモード光伝送路である。屈折率分布スラブ導波路 4 8 0 1 は、厚さ方向の中心に最大屈折率 n_{\max} を有し、中心から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を有する。屈折率分布スラブ導波路 4 8 0 1 は、幅方向には一定の屈折率を有し屈折率を持たない。屈折率分布スラブ導波路 4 8 0 1 は、入射面 4 8 0 2 と、反射面 4 8 0 3 と、出射面 4 8 0 7 とを備える。

入射面 4 8 0 2 は、幅方向の中心位置に入射光 4 8 0 4 を入射させる入射部（図示せず）と、幅方向の中心に対して対称な位置から出射する出射光 4 8 0 5 を受光する受光部（図示せず）と、出射光 4 8 0 6 を受光する受光部（図

示せず)とのすべてに対向する。出射面4807は、幅方向の中心に対して対称な位置から出射する出射光4808を受光する受光部(図示せず)と、出射光4809を受光する受光部(図示せず)とのすべてに対向する。また、反射面4803は、端面にアルミニウム等の金属を蒸着してできたハーフミラーである。反射面4803は、入射した信号光の内、半分を透過し残りを反射させる。

実施の形態24の変形例において、屈折率分布スラブ導波路4801は、スラブ長 L を、ほぼ $n_0 \times W_0^2 / (2\lambda)$ に一致させ、出射光4805と、出射光4806との間隔 D_1 を、ほぼ $W_0 / 2$ に一致させている。また、反射面4803は、スラブ長 L がちょうど半分の長さになる位置に形成されている。ただし、 n_0 は、幅方向に励起する0次モード光の実効屈折率である。

以上の構成により、入射部から屈折率分布スラブ導波路4801へ入射した信号光は、 z 方向の正方向に伝搬して反射面4803で一部が反射し、他は透過する。反射した信号光は、実施の形態24で説明したように、マルチモード干渉のセルフイメージング原理に基づいて、入射面4802から出射光4805と、出射光4806として出射される。一方、透過した信号光は、実施の形態1と全く同様に、マルチモード干渉のセルフイメージング原理に基づいて、出射光4808と、出射光4809として出射される。

以上のように、実施の形態24の変形例に係る光デバイスによれば、幅方向の中心位置に入射した入射光を、幅方

向の中心に対称に4分岐させる光分岐器を、実施の形態1と同じスラブ長を持つ屈折率分布スラブ導波路により実現することができる。また、実施の形態24の変形例に係る光デバイスは、幅方向の中心位置に入射した入射光を、幅方向の中心に対称に2分岐した出射光として、相異なる2方向に出射させることができる。

産業上の利用可能性

本発明は、高速マルチモード光通信に用いられる光分岐器、光合成器、光分波器、光合波器、スターカップラ、光スイッチ等の光デバイスに好適である。また、本発明は、高速マルチモード光配線に用いられる光ストレートシートバス、光クロスシートバス等に好適である。

請求の範囲

1. 外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

前記入力信号に対応する信号光を、前記光伝送路へ入射光として入射させ、

前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

前記光伝送路から前記出射光を出射させ、前記出射光に対応する前記出力信号を出力することを特徴とする、光デバイス。

2. 前記光伝送路は、前記光伝送路の前記幅方向に励振する第0次モードの伝搬定数と、第1次モードの伝搬定数との間の差の関数で表される前記長さ方向の大きさを持つ、請求項1に記載の光デバイス。

3. 前記光伝送路は、前記幅方向の基本モード幅と、前記

厚さ方向の最大屈折率と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長との関数で表される前記長さ方向の大きさを持つ、請求項 1 に記載の光デバイス。

4. 前記光伝送路は、前記厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 1 に記載の光デバイス。

5. 前記屈折率分布は、ほぼ 2 次関数に沿って変化する、請求項 4 に記載の光デバイス。

6. 前記光伝送路は、ポリシランからなる、請求項 4 に記載の光デバイス。

7. 前記光伝送路は、ポリシランからなり、当該ポリシランが硬化する際の酸素濃度分布によって屈折率分布が施される、請求項 6 に記載の光デバイス。

8. 前記入力信号は、電気信号であり、当該電気信号を前記信号光へ変換し、前記信号光を前記光伝送路へ前記入射光として入射させる入射部を備える、請求項 1 に記載の光デバイス。

9. 前記入射部は、前記光伝送路の前記幅方向にアレイ状に並ぶ複数の発光部を有する、請求項 8 に記載の光デバイス。

10. 前記入力信号は、信号光であり、当該信号光を前記光伝送路へ入射光として入射させる入射部を備える、請求項1に記載の光デバイス。

11. 前記出力信号は、電気信号であり、前記光伝送路から出射された出射光として前記信号光を受光し、当該信号光を前記電気信号へ変換する出射部を備える、請求項1に記載の光デバイス。

12. 前記出射部は、前記光伝送路の幅方向にアレイ状に並ぶ複数の受光部を有する、請求項11に記載の光デバイス。

13. 前記出力信号は、信号光であり、当該信号光を前記光伝送路から出射光として出射させる出射部を備える、請求項1に記載の光デバイス。

14. 前記光デバイスは、少なくとも1個の前記入力信号を入力し、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記出力信号として出力可能である光 N 分岐デバイスであり、

前記光伝送路は、

前記入射光を入射させるための入射面と、

前記出射光を出射させるための出射面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した0次モード光の実効屈折率

を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

前記入射面上であって前記幅方向の中心に 1 個の入射光を入射させ、前記出射面上であって前記幅方向の中心に对称に N 個の出射光を生成する、請求項 1 に記載の光デバイス。

$$\frac{1}{N} \cdot \frac{n_0 W_0^2}{\lambda}$$

15. 前記光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記入力信号を入力し、少なくとも 1 個の前記出力信号として出力可能である光 N 合成デバイスであり、

前記光伝送路は、

前記入射光を入射させるための入射面と、

前記出射光を出射させるための出射面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

前記入射面上であって前記幅方向の中心に对称にすべて同一の波長 λ を有する N 個の入射光を入射させ、前記出射面上であって前記幅方向の中心に 1 個の出射光を生成する、請求項 1 に記載の光デバイス。

$$\frac{1}{N} \cdot \frac{n_0 W_0^2}{\lambda}$$

16. 前記光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該入力信号に 1 対 1 対応する N 個の前記出力信号として出力可能であるストレートシートバスであり、

前記光伝送路は、

前記入射光を入射させるための入射面と、

前記出射光を出射させるための出射面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、前記幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

前記入射面上であって前記幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の前記入射光を入射させ、前記出射面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向の位置が同一である位置にそれぞれ、 N 個の前記入射光に 1 対 1 対応する N 個の前記出射光を生成する、請求項 1 に記載の光デバイス。

$$\frac{8n_0 W_0^2}{\lambda}$$

17. 前記光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該入力信号に 1 対 1 対応する

N 個の前記出力信号として出力可能であるクロスシートバスであり、

前記光伝送路は、

前記入射光を入射させるための入射面と、

前記出射光を出射させるための出射面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、前記幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の奇数倍になる値であり、

前記入射面上であって前記幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の前記入射光を入射させ、前記出射面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向の位置が前記幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、N 個の前記入射光と 1 対 1 対応する N 個の前記出射光を生成する、請求項 1 に記載の光デバイス。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

18. 前記光デバイスは、N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該入力信号にそれぞれ対応する N 個の前記出力信号として出力するスターカップラであり、

前記光伝送路は、

前記入射光を入射させるための入射面と、

前記出射光を出射させるための出射面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、前記幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の値であり、

前記入射面上であって前記幅方向の所定の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の前記入射光を入射させ、前記出射面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向の位置が前記幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、前記入射光のいずれの 1 個に対しても N 個の前記出射光を生成する、請求項 1 に記載の光デバイス。

$$\left(p \pm \frac{1}{N}\right) \frac{4n_0 W_0^2}{\lambda} \quad (p \text{ はかっこ内を正の値にする整数})$$

19. 前記光デバイスは、 N_{EVEN} ($N_{\text{EVEN}} = 2, 4, 6, \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該入力信号にそれぞれ対応する N_{EVEN} 個の前記出力信号として出力するスターカプラであり、

前記光伝送路は、前記入射面上であって前記幅方向の中心に対称な位置にすべて同一の波長 λ を有する N_{EVEN} 個の前記入射光を入射させる、請求項 18 に記載の光デバイス。

20. 前記光デバイスは、 N_{ODD} ($N_{\text{ODD}} = 1, 3, 5, \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該入力信号にそれぞれ対応する N_{ODD} 個の前記出力信号として出力するスターカプラであり、

前記光伝送路は、前記入射面上であって前記幅方向の中心に非対称な位置にすべて同一の波長 λ を有する N_{ODD} 個の前記入射光を入射させる、請求項18に記載の光デバイス。

21. 前記光デバイスは、 N ($N = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該第1の入力信号に1対1対応する N 個の前記出力信号として出力可能であり、 M ($M = 1, 2, 3 \dots$) 個の前記入力信号を入力し、当該入力信号に1対1対応する M 個の前記出力信号として出力可能である双方向ストレートシートバスであり、

前記光伝送路は、

前記長さ方向の一方の端部に形成された第1面と、

前記長さ方向の他方の端部に形成された第2面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、前記幅方向に励起した0次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の整数倍になる値であり、

前記第1面上であって前記幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の前記入射光を入射させ、前記第2面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向の位置が同一である位置にそれぞれ、 N 個の前記入射光と1対1対応する N 個の前記出射光を生成し、

前記第2面上であって前記幅方向の任意の位置に前記

第 1 面に入射する入射光とすべて同一の波長 λ を有する M 個の前記入射光を入射させ、前記第 1 面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向の位置が同一である位置にそれぞれ、M 個の前記入射光と 1 対 1 対応する M 個の前記出射光を生成する、請求項 1 に記載の光デバイス。

$$\frac{8n_0W_0^2}{\lambda}$$

2 2 . 前記光デバイスは、N (N = 1 , 2 , 3 . . .) 個の第 1 の入力信号を入力し、当該第 1 の入力信号に 1 対 1 対応する N 個の第 1 の出力信号として出力可能であり、M (M = 1 , 2 , 3 . . .) 個の第 2 の入力信号を入力し、当該第 2 の入力信号に 1 対 1 対応する M 個の前記出力信号として出力可能である双方向クロスシートバスであり、

前記光伝送路は、

前記長さ方向の一方の端部に形成された第 1 面と、

前記長さ方向の他方の端部に形成された第 2 面とを含み、

前記長さ方向の大きさが、前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、前記幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の奇数倍になる値であり、

前記第 1 面上であって前記幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有する N 個の前記入射光を入射させ、前記第 2 面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向

の位置が前記幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、N個の前記入射光と1対1対応するN個の前記出射光を生成し、

前記第2面上であって前記幅方向の任意の位置にすべて同一の波長 λ を有するM個の前記入射光を入射させ、前記第1面上であって各前記入射光の入射位置と前記幅方向の位置が前記幅方向の中心に対して対称になる位置にそれぞれ、M個の前記入射光と1対1対応するM個の前記出射光を生成する、請求項1に記載の光デバイス。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

23. 前記光伝送路は、前記長さ方向の一方の端部に形成され前記厚さ方向に平行な方向に沿って入射する前記入射光の光路を前記長さ方向へほぼ90°折り曲げる反射面、及び／又は前記長さ方向の他方の端部に形成され前記長さ方向に沿って伝送された前記出射光の光路を前記厚さ方向に平行な方向に沿って出射させるようにほぼ90°折り曲げる反射面を含む、請求項1に記載の光デバイス。

24. 前記光伝送路は、前記長さ方向の一方の端部に形成され前記厚さ方向に傾斜した方向に沿って入射する入射光の光路を前記長さ方向へ折り曲げるプリズム、及び／又は前記長さ方向の他方の端部に形成され前記長さ方向に沿って伝送された出射光の光路を前記厚さ方向に傾斜した方向に沿って出射させるように折り曲げるプリズムを含む、請

求項 1 に記載の光デバイス。

25. 前記光伝送路は、前記厚さ方向に複数の固有モードを有する、請求項 1 に記載の光デバイス。

26. 前記光伝送路は、 $20\ \mu\text{m}$ 以上の厚さを有する、請求項 1 に記載の光デバイス。

27. 前記光伝送路は、前記長さ方向及び前記厚さ方向を含む任意の相異なる 2 個の断面において、前記厚さ方向の中心位置が、常に同一の曲線を描くように湾曲している、請求項 1 に記載の光デバイス。

28. 前記光伝送路は、前記長さ方向及び前記厚さ方向を含む任意の相異なる 2 個の断面において、前記厚さ方向の中心位置が、異なる曲線を描くように振れている、請求項 1 に記載の光デバイス。

29. 外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光集積デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を前記厚さ方向に複数積層してなる光伝送部を備え、

前記入力信号に対応する信号光を、各前記光伝送路へ入

射光として入射させ、

各前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

各前記光伝送路から前記出射光を出射させ、前記出射光に対応する前記出力信号を出力することを特徴とする、光集積デバイス。

30. 外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスの製造方法であって、

前記光デバイスは、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

前記入射信号に対応する信号光を、前記光伝送路へ入射光として入射させ、

前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射

光を生成し、

前記光伝送路から前記出射光を出射させ、前記出射光に対応する前記出力信号を出力し、

前記光デバイスの製造方法において、

前記光伝送路の材料である樹脂を硬化させるために印加されるべきエネルギーが伝達可能な材料からなり、少なくとも前記光伝送路の前記厚さ方向と同一の深さを持つ凹部を含む成形型を準備する第1の工程と、

前記凹部に、前記樹脂を充填する第2の工程と、

前記樹脂が充填された前記成形型に対して、前記厚さ方向の上下から所定量の前記エネルギーを印加する第3の工程と、

所望の前記屈折率分布が形成されて硬化した前記樹脂に対して、前記光伝送路にするために、少なくとも前記長さ方向の大きさを決定して、入出射光の接続部分を形成する第4の工程とを備える、光デバイスの製造方法。

31. 前記第3の工程において、

前記エネルギーの印加は、所定波長の紫外線の照射であり、

前記第1の工程において、

準備される前記成形型は、所定波長の紫外線に対して透明な材料からなる、請求項30に記載の光デバイスの製造方法。

32. 前記第3の工程において、

前記エネルギーの印加は、加熱である、請求項 30 に記載の光デバイスの製造方法。

33. 前記光伝送路は、前記厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 30 に記載の光デバイスの製造方法。

34. 前記屈折率分布は、ほぼ 2 次関数に沿って変化する、請求項 33 に記載の光デバイスの製造方法。

35. 前記光伝送路は、ポリシランからなる、請求項 33 に記載の光デバイスの製造方法。

36. 前記光伝送路は、ポリシランからなり、当該ポリシランが硬化する際の酸素濃度分布によって屈折率分布が施される、請求項 35 に記載の光デバイスの製造方法。

37. 前記第 1 の工程において、

前記成形型は、製造すべき前記光伝送路が複数個含まれる大きさを有する凹部を含み、

前記第 4 の工程において、

前記樹脂を切断することにより、複数個の光伝送路を同時に製造する、請求項 30 に記載の光デバイスの製造方法。

38. 前記第1の工程において、

前記成形型は、製造すべき前記光伝送路の前記幅方向にほぼ等しい大きさを有する凹部を含み、

前記第4の工程において、

前記樹脂を切断することにより、前記長さ方向の大きさを決定する、請求項30に記載の光デバイスの製造方法。

39. 前記第1の工程において、

前記成形型は、製造すべき前記光伝送路にほぼ等しい大きさを有する凹部を含み、

前記第4の工程において、

前記光伝送路へ前記入射光及び前記出射光を入出射させるべき位置の前記凹部の壁面を除去する、請求項30に記載の光デバイスの製造方法。

40. さらに、前記第4の工程の前後のいずれか一方に、

前記成形型から前記光伝送路を離型する第5の工程を含む、請求項30に記載の光デバイスの製造方法。

41. 互いに異なる2個の波長が重ね合わされた多重信号光を入力し、当該多重信号光を波長に応じて分波して、2個の互いに異なる信号光として出力可能である光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れ

るに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

前記多重信号光を、前記光伝送路へ入射光として入射させ、

前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に各波長ごとに複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、同一の波長の信号光について複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより、波長に応じて幅方向の異なる位置に２個の前記出射光を生成し、

前記光伝送路から２個の前記出射光を出射させることを特徴とする、光デバイス。

４２．２個の前記出射光は、互いの光量の比が、最大になる前記幅方向の位置からそれぞれ出射される、請求項４１に記載の光デバイス。

４３．２個の前記出射光は、互いの光量が最小になる前記幅方向の位置からそれぞれ出射される、請求項４１に記載の光デバイス。

４４．前記光伝送路は、前記光伝送路の前記幅方向に励振する第０次モードの伝搬定数と、第１次モードの伝搬定数との間の差の関数で表される前記長さ方向の大きさを持つ、請求項４１に記載の光デバイス。

4 5 . 前記光伝送路は、直方体形状であり、前記幅方向の基本モード幅と、前記厚さ方向の最大屈折率と、前記マルチモード光伝送路中を伝送される光の波長との関数で表される前記長さ方向の大きさを持つ、請求項 4 1 に記載の光デバイス。

4 6 . 前記光伝送路は、前記厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 4 1 に記載の光デバイス。

4 7 . 前記屈折率分布は、ほぼ 2 次関数に沿って変化する、請求項 4 6 に記載の光デバイス。

4 8 . 互いに異なる波長を持つ 2 個の信号光を入力し、当該信号光を合波して、互いに異なる 2 個の波長が重ね合わされた多重信号光として出力可能である光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を備え、

2 個の前記信号光を、前記光伝送路へ入射光として入射させ、

前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方

に直交する幅方向に各波長ごとに複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、同一の波長の信号光について複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより、波長に応じて幅方向の同一位置に多重信号光である前記出射光を生成し、

前記光伝送路から前記出射光を出射させることを特徴とする、光デバイス。

49. 外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含み、前記厚さ方向に直交する幅方向に隣接する第1の部分光伝送路及び第2の部分光伝送路からなる光伝送路と、

外部から供給される制御信号に基づいて、前記第1及び第2の部分光伝送路の内、少なくとも一方の前記屈折率分布を変更可能である屈折率変調手段とを備え、

前記屈折率変調手段の動作に基づいて、前記第1の部分光伝送路のみを用いて前記入射光を伝送する第1の状態と、前記第1及び第2の部分光伝送路を用いて前記入射光を伝送する第2の状態との間を選択可能であり、

前記入射信号に対応する信号光を、前記第1の光伝送路へ入射光として入射させ、

前記第1の状態である場合、

前記第1の光伝送路の内部において、前記厚さ方向及

び前記幅方向に直交する長さ方向に沿って、前記幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

前記第 1 の光伝送路から前記出射光を出射させ、前記出射光に対応する前記出力信号を出力する一方、

前記第 2 の状態である場合、

前記第 1 及び第 2 の光伝送路の内部において、前記厚さ方向に沿って、前記幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

前記第 2 の光伝送路から前記出射光を出射させ、前記出射光に対応する前記出力信号を出力することを特徴とする、光デバイス。

50. 前記屈折率変調手段は、

前記第 1 のマルチモード部分光伝送路の前記屈折率分布を変更可能であり、

前記第 2 の状態において、前記第 1 及び第 2 のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を等しくし、

前記第 1 の状態において、前記第 1 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、前記第 2 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より大きくする、請求項 49 に記載の光デバイス。

5 1 . 前記屈折率変調手段は、

前記第 2 のマルチモード部分光伝送路の前記屈折率分布を変更可能であり、

前記第 2 の状態において、前記第 1 及び第 2 のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を等しくし、

前記第 1 の状態において、前記第 2 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、前記第 1 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より小さくする、請求項 4 9 に記載の光デバイス。

5 2 . 前記屈折率変調手段は、

前記第 1 及び 2 のマルチモード部分光伝送路の前記屈折率分布を変更可能であり、

前記第 2 の状態において、前記第 1 及び第 2 のマルチモード部分光伝送路の屈折率分布を等しくし、

前記第 1 の状態において、前記第 1 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、前記第 2 の状態における前記第 2 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より大きくするとともに、前記第 2 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率を、前記第 2 の状態における前記第 1 のマルチモード部分光伝送路の最大屈折率より小さくする、請求項 4 9 に記載の光デバイス。

5 3 . 前記第 1 及び第 2 のマルチモード部分光伝送路の内、前記屈折率変調手段によって、前記屈折率分布が変更可能である光伝送路は、熱光学効果を呈するポリマーからな

り、

前記屈折率変調手段は、前記制御信号に応じて熱の発生／吸収が可能な冷熱シートを含み、

前記冷熱シートによって前記光伝送路の温度を変化させて屈折率分布を変化させる、請求項 49 に記載の光デバイス。

54．前記光伝送路は、

前記長さ方向の大きさが、前記伝送路の前記幅方向の基本モード幅を W_0 と、前記幅方向に励起した 0 次モード光の実効屈折率を n_0 と、前記第 1 及び第 2 の光伝送路中を伝送される光の波長を λ としたとき、ほぼ以下の式の奇数倍になる値である、請求項 49 に記載の光デバイス。

$$\frac{4n_0W_0^2}{\lambda}$$

55．前記光伝送路は、

光伝送路を加えた前記幅方向に対して $(1/\sqrt{2})$ 倍になる前記幅方向の大きさを持つ、請求項 49 に記載の光デバイス。

56．前記光伝送路は、前記厚さ方向の中央位置が最大屈折率であり、中心位置から離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 49 に記載の光デバイス。

57. 各前記屈折率分布は、ほぼ2次関数に沿って変化する、請求項56に記載の光デバイス。

58. 直線上に並べられた N ($N = 2, 3, 4 \dots$) 個の信号光の間隔を変化させるための光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を、前記直線に沿って N 個配置し、

各前記信号光を、各前記光伝送路へ入射光として入射させ、

各前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより、前記幅方向において前記入射光が各前記光伝送路へ入射した位置とは異なる位置に出射光を生成し、

各前記光伝送路から前記信号光として前記出射光を出射させる、光デバイス。

59. 各前記光伝送路は、

前記入射光を入射させるための入射面と、

前記出射光を出射させるための出射面とを含み、

前記入射面上であって前記幅方向の任意の位置に前記入射光を入射させ、前記出射面上であって各前記入射光の

入射位置と前記幅方向の位置が前記幅方向の中心に対して対称になる位置に前記出射光を生成する、請求項 58 に記載の光デバイス。

60. 前記光デバイスは、前記信号光の間隔を拡大する、請求項 58 に記載の光デバイス。

61. さらに、シート状の入射側光伝送路を備え、当該光伝送路は、1 個の入射光を N 個に分岐する光 N 分岐デバイスであり、 N 分岐された出射光を前記信号光として各前記光伝送路に接続する、請求項 58 に記載の光デバイス。

62. 信号光の位置を変化させるための光デバイスであって、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を複数備え、

前記光伝送路から出射される出射光が、他の前記光伝送路へ入射すべき入射光になるよう複数の前記光伝送路を多段接続し、

前記信号光を、前記光伝送路へ入射光として入射させ、
各前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モー

ドが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより、前記幅方向において前記入射光が各前記光伝送路へ入射した位置とは異なる位置に出射光を生成し、

各前記光伝送路から前記信号光として前記出射光を出射させる、光デバイス。

6 3 . 前記信号光は、直線上に並べられた N ($N = 2, 3, 4 \dots$) 個の信号光であり、

シート状であり、当該シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む光伝送路を、 N 個の前記信号光同士の間隔を変化させるために前記直線に沿って N 個配置し、

各前記信号光を、各前記光伝送路へ入射光として入射させ、

各前記光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより、前記幅方向において前記入射光が各前記光伝送路へ入射した位置とは異なる位置に出射光を生成し、

各前記光伝送路から前記信号光として前記出射光を出射させる、請求項 6 2 に記載の光デバイス。

6 4 . 外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号

との間を、信号光により接続する光デバイスであって、

シート状であり、前記シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含むシート状光伝送路と、

前記入力信号に応じた前記入射光を、前記シート状光伝送路へ入射させるために伝送する入射側光伝送路と、

前記入射側光伝送路と前記シート状光伝送路とを接続し、前記入射側光伝送路のモードフィールドを、前記シート状光伝送路へ入射できるように変換する入射側ビーム変換部と、

前記シート状光伝送路から前記出射光を、前記出力信号として出射させるために伝送する出射側光伝送路と、

前記出射側光伝送路と前記シート状光伝送路とを接続し、前記シート状光伝送路のモードフィールドを、前記出射側光伝送路へ入射できるように変換する出射側ビーム変換部とを備え、

入射側ビーム変換部から出射する前記信号光を、前記シート状光伝送路へ入射光として入射させ、

前記シート状光伝送路の内部において、前記厚さ方向に直交する長さ方向に沿って、前記長さ方向及び前記厚さ方向の両方に直交する幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで前記入射光を伝送するとともに、複数の前記固有モードが前記長さ方向に沿って相互に干渉することにより出射光を生成し、

前記シート状光伝送路から前記出射光を出射させ、前記

出射側ビーム変換部へ入射させる、光デバイス。

65. 前記入射側ビーム変換部は、

中心を最大屈折率として中心から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有するレンズ素子であり、

前記シート状光伝送路に入射される前記信号光と同数配置される、請求項64に記載の光デバイス。

66. 前記入射側ビーム変換部は、

前記入射側光伝送路側からシート状光伝送路側へ向けて、中心と周辺との間の屈折率の変化が次第に大きくなる前記屈折率分布を含む、請求項65に記載の光デバイス。

67. 前記入射側ビーム変換部は、

前記シート状光伝送路の前記厚さ方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有するスラブ導波路であり、

前記シート状光伝送路に入射される前記信号光と同数配置される、請求項64に記載の光デバイス。

68. 前記スラブ導波路は、前記幅方向の大きさが前記シート状光伝送路との接続部に向けて小さくなる形状を備える、請求項67に記載の光デバイス。

69. 前記入射側ビーム変換部は、前記シート状光伝送路と一体的に形成される、請求項67に記載の光デバイス。

7 0 . 前記入射側ビーム変換部は、

前記シート状光伝送路の前記厚さ方向に平行な方向及び前記幅方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する光伝送路であり、

前記シート状光伝送路に対して1個配置される、請求項64に記載の光デバイス。

7 1 . 前記出射側ビーム変換部は、

中心を最大屈折率として中心から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有するレンズ素子であり、

前記シート状光伝送路から出射される前記信号光と同数配置される、請求項64に記載の光デバイス。

7 2 . 前記出射側光伝送路は、

中心を最大屈折率として中心から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する光ファイバであり、

前記出射側ビーム変換部は、

前記出射側光伝送路側からシート状光伝送路側へ向けて、中心と周辺との間の屈折率の変化が次第に大きくなる前記屈折率分布を含む、請求項65に記載の光デバイス。

7 3 . 前記出射側ビーム変換部は、

前記シート状光伝送路の前記厚さ方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈

折率が減少する屈折率分布を有するスラブ導波路であり、

前記シート状光伝送路から出射される前記信号光と同数配置される、請求項 6 4 に記載の光デバイス。

7 4 . 前記スラブ導波路は、前記幅方向の大きさが前記シート状光伝送路との接続部に向けて小さくなる形状を備える、請求項 7 3 に記載の光デバイス。

7 5 . 前記出射側ビーム変換部は、前記シート状光伝送路と一体的に形成される、請求項 7 3 に記載の光デバイス。

7 6 . 前記出射側ビーム変換部は、

前記シート状光伝送路の前記厚さ方向に平行な方向及び前記幅方向に平行な方向の中心部に最大屈折率を有し、中心部から離れるに従って屈折率が減少する屈折率分布を有する光伝送路であり、

前記シート状光伝送路に対して 1 個配置される、請求項 6 4 に記載の光デバイス。

7 7 . 外部から入力される入力信号と出力すべき出力信号との間を、信号光により接続する光デバイスの製造方法であって、

前記光デバイスは、

シート状であり、前記シートの厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含むシート

状光伝送路と、

前記入力信号に応じた前記入射光を、前記シート状光伝送路へ入射させるために伝送する入射側光伝送路と、

前記入射側光伝送路と前記シート状光伝送路とを接続し、前記入射側光伝送路のモードフィールドを、前記シート状光伝送路へ入射できるように変換する入射側ビーム変換部と、

前記出射光を、前記シート状光伝送路から前記出力信号として出射させるために伝送する出射側光伝送路と、

前記出射側光伝送路と前記シート状光伝送路とを接続し、前記シート状光伝送路のモードフィールドを、前記出射側光伝送路へ入射できるように変換する出射側ビーム変換部とを備え、

前記シート状光伝送路と、前記入射側ビーム変換部及び前記出射側ビーム変換部の内の少なくとも一方とに対応する凹部を有し、前記シート状光伝送路の材料である樹脂を硬化させるために印加されるべきエネルギーが伝達可能な材料からなる成形型を準備する第1の工程と、

前記凹部に、前記樹脂を充填する第2の工程と、

前記樹脂が充填された前記成形型に、前記樹脂を硬化させて所望の前記屈折率分布を形成するために、前記厚さ方向の上下から所定量の前記エネルギーを印加する第3の工程と、

硬化した前記樹脂に、前記凹部に形成されていない前記入射側ビーム変換部及び前記出射側ビーム変換部がある場合には当該変換部を接続し、さらに、前記入射側光伝送

路と、前記出射側光伝送路とを接続する第４の工程とを備える、光デバイスの製造方法。

７８．前記エネルギーの印加は、所定波長の紫外線の照射であり、

前記成形型は、所定波長の紫外線に対して透明な材料からなる、請求項７７に記載の光デバイスの製造方法。

７９．前記エネルギーの印加は、加熱である、請求項３０に記載の光デバイスの製造方法。

８０．前記第４工程に先立って、硬化した前記樹脂を成形型から離型する第５の工程を備える、請求項７７に記載の光デバイスの製造方法。

８１．前記第４工程において、

硬化した前記樹脂に、前記成形型に形成されていない前記入射側ビーム変換部及び前記出射側ビーム変換部がある場合には当該変換部を接続し、さらに、前記入射側光伝送路と、前記出射側光伝送路とを接続する際に、当該光伝送路を位置決めするための位置決め部が形成された基板に各前記光伝送路を配置する、請求項８０に記載の光デバイスの製造方法。

８２．前記第１の工程において、

前記成形型は、前記入射側光伝送路及び前記出射側光

伝送路の少なくとも一方を位置決めするための位置決め部を含み、

前記第 4 の工程において、

前記位置決め部が形成された前記成型型に各伝送路を配置する、請求項 77 に記載の光デバイスの製造方法。

83. 前記入射側光伝送路は、光ファイバである、請求項 77 に記載の光デバイスの製造方法。

84. 前記出射側光伝送路は、光ファイバである、請求項 77 に記載の光デバイスの製造方法。

85. 外部から入射する信号光を伝送し、伝送した信号光を外部へ出射する光デバイスであって、

第 1 方向に屈折率分布を含み、信号光を複数の光路によって前記第 1 方向に直交する第 2 方向に伝送可能な光伝送路を備え、

前記光伝送路へ入射する信号光の光軸、及び前記光伝送路から出射する信号光の光軸の内、少なくとも一方は、前記第 2 方向と平行でなく、

前記複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に前記光伝送路へ入射する二つの光路は、前記光伝送路へ入射する位相差と前記光伝送路から出射する位相差とが等しいことを特徴とする光デバイス。

86. 前記光伝送路へ信号光を入射するための入射部と、

前記光伝送路から信号光を出射するための出射部とを備え、

前記入射部及び前記出射部の内、少なくとも一方は、内部を伝送する信号光の光軸が、前記第2方向と平行でない方向になるように、前記光伝送路と結合する、請求項85に記載の光デバイス。

87. 前記入射部及び前記出射部の内、少なくとも一方は、内部を伝送する信号光の光軸が、前記第2方向と直交するように、前記光伝送路と結合している、請求項86に記載の光デバイス。

88. 前記二つの光路は、伝送される信号光の波長の整数倍に等しい光学的な光路長差を持つ、請求項86に記載の光デバイス。

89. 前記二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を m 個 ($m = 1, 2, 3 \dots$) 含み、

前記 m 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和が、信号光の波長の自然数倍に等しい、請求項88に記載の光デバイス。

90. 前記光伝送路は、

前記第1方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、前記第1方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第1方向に沿って離れるに

従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 89 に記載の光デバイス。

91. 前記シート状光伝送路は、

前記第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記光路長差発生部は、前記第 1 及び前記第 2 反射面により反射される前記二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である、請求項 90 に記載の光デバイス。

92. 前記シート状光伝送路において、

前記第 1 反射面により信号光のすべてが前記第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが前記第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、前記屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の j 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい、請求項 90 に記載の光デバイス。

93. 前記二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、

前記 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和が、ゼロである、請求項 88 に記載の光デバイス。

9 4 . 前記光伝送路は、

前記第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、前記第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 9 3 に記載の光デバイス。

9 5 . 前記シート状光伝送路は、

前記第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記光路長差発生部は、前記第 1 及び前記第 2 反射面により反射される前記二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である、請求項 9 4 に記載の光デバイス。

9 6 . 前記シート状光伝送路において、

前記第 1 反射面により信号光のすべてが前記第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが前記第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、前記屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい、請求項 9 4 に記載の光デバイス。

9 7 . 前記二つの光路は、光学的な光路長差がゼロである

、請求項 86 に記載の光デバイス。

98. 前記二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、

前記 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和が、ゼロである、請求項 97 に記載の光デバイス。

99. 前記光伝送路は、

前記第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、前記第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 98 に記載の光デバイス。

100. 前記シート状光伝送路は、

前記第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記光路長差発生部は、前記第 1 及び前記第 2 反射面により反射される前記二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である、請求項 99 に記載の光デバイス。

101. 前記シート状光伝送路において、

前記第 1 反射面により信号光のすべてが前記第 2 方向

へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが前記第2反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、前記屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい、請求項99に記載の光デバイス。

102. 前記二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない、請求項97に記載の光デバイス。

103. 前記光伝送路は、

前記第1方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路であり、前記第1方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第1方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項102に記載の光デバイス。

104. 前記シート状光伝送路は、

前記第2方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第2方向へ折り曲げるための第1反射面と、

前記第2方向に伝送した信号光の光軸を、前記第2方向と平行でない方向へ折り曲げるための第2反射面とを含み、

前記中心部における前記第1反射面と前記第2反射面との間の物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $j/2$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しく、

信号光は、前記第 1 反射面及び第 2 反射面上の、前記光伝送路の第 1 方向の厚さが半分となる中心部で、前記第 1 方向及び第 2 方向に共に直交する第 3 方向に平行な線状に集光される、請求項 103 に記載の光デバイス。

105. 外部から入射する信号光を伝送し、伝送した信号光をマルチモード干渉によって所定の位置から外部へ出射する光デバイスであって、

第 1 方向に屈折率分布を含み、信号光を前記第 1 方向に直交する第 2 方向に伝送可能であり、前記第 1 方向に信号光を閉じこめ可能なシート状光伝送路と、

前記シート状光伝送路へ信号光を入射するための M 個 ($M = 1, 2, 3 \dots$) の入射部と、

前記シート状光伝送路から信号光を出射するための N 個 ($N = 1, 2, 3 \dots$) の出射部とを備え、

前記 M 個の入射部及び前記 N 個の出射部は、内部を伝送する信号光の光軸が前記第 2 方向と平行でない方向に前記シート状光伝送路と結合する少なくとも一つの非平行入出射部を含み、

前記非平行入出射部と対応する前記入射部又は前記出射部との間を伝送する信号光の複数の光路の内、信号光の光軸に関して互いに対称に前記シート状光伝送路へ入射する二つの光路は、前記シート状光伝送路へ入射する位相差と前記シート状光伝送路から出射する位相差とが等しく、

前記 M 個の入射部及び前記 N 個の出射部は、すべて所定のマルチモード干渉のセルフイメージング原理の条件を

満足する位置に配置されていることを特徴とする光デバイス。

106. 前記非平行入出射部は、内部を伝送する信号光の光軸が、前記第2方向と直交するように、前記光伝送路と結合する、請求項105に記載の光デバイス。

107. 前記二つの光路は、伝送される信号光の波長の整数倍に等しい光学的な光路長差を持つ、請求項105に記載の光デバイス。

108. 前記二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を m 個 ($m = 1, 2, 3 \dots$) 含み、

前記 m 個の光路長差発生部で発生する光学的な光路長差の和が、信号光の波長の自然数倍に等しい、請求項107に記載の光デバイス。

109. 前記シート状光伝送路は、

前記第1方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第1方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項108に記載の光デバイス。

110. 前記シート状光伝送路は、

前記第2方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第2方向へ折り曲げるための第1反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記光路長差発生部は、前記第 1 及び前記第 2 反射面により反射される前記二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である、請求項 109 に記載の光デバイス。

111. 前記シート状光伝送路において、

前記第 1 反射面により信号光のすべてが前記第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが前記第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、前記屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の j 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい、請求項 109 に記載の光デバイス。

112. 前記二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、

前記 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和が、ゼロである、請求項 107 に記載の光デバイス。

113. 前記シート状光伝送路は、

前記第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 112 に記載の光デバイス。

1 1 4 . 前記シート状光伝送路は、

前記第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記光路長差発生部は、前記第 1 及び前記第 2 反射面により反射される前記二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である、請求項 1 1 3 に記載の光デバイス。

1 1 5 . 前記シート状光伝送路において、

前記第 1 反射面により信号光のすべてが前記第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが前記第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、前記屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい、請求項 1 1 3 に記載の光デバイス。

1 1 6 . 前記二つの光路は、光学的な光路長差がゼロである、請求項 1 0 5 に記載の光デバイス。

1 1 7 . 前記二つの光路は、光学的な光路長差が生じる光路長差発生部を n 個 ($n = 2, 3, 4 \dots$) 含み、

前記 n 個の光路長差発生部で発生する光路長差の和が、ゼロである、請求項 1 1 6 に記載の光デバイス。

1 1 8 . 前記シート状光伝送路は、

前記第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 1 1 7 に記載の光デバイス。

1 1 9 . 前記シート状光伝送路は、

前記第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記光路長差発生部は、前記第 1 及び前記第 2 反射面により反射される前記二つの光路の屈折率履歴が異なる部分である、請求項 1 1 8 に記載の光デバイス。

1 2 0 . 前記シート状光伝送路において、

前記第 1 反射面により信号光のすべてが前記第 2 方向へ折り曲げられた位置から、信号光のすべてが前記第 2 反射面に入射する直前の位置までの物理的な光路長が、前記屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $(j + 0.5)$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しい、請求項 1 1 8 に記載の光デバイス。

1 2 1 . 前記二つの光路は、光学的な光路長差が発生する部分を持たない、請求項 1 1 6 に記載の光デバイス。

1 2 2 . 前記シート状光伝送路は、

前記第 1 方向の厚さが半分となる中心部の屈折率が最大で、前記中心部から第 1 方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む、請求項 1 2 1 に記載の光デバイス。

1 2 3 . 前記シート状光伝送路は、

前記第 2 方向と平行でない方向から入射した信号光の光軸を、前記第 2 方向へ折り曲げるための第 1 反射面と、

前記第 2 方向に伝送した信号光の光軸を、前記第 2 方向と平行でない方向へ折り曲げるための第 2 反射面とを含み、

前記中心部における前記第 1 反射面と前記第 2 反射面との間の物理的な光路長が、屈折率分布に基づいて蛇行して伝送される光路の蛇行周期の $j / 2$ 倍 ($j = 0, 1, 2, 3 \dots$) に等しく、

信号光は、前記第 1 反射面及び第 2 反射面上の、前記光伝送路の第 1 方向の厚さが半分となる中心部で、前記第 1 方向及び第 2 方向に共に直交する第 3 方向に平行な線状に集光される、請求項 1 2 2 に記載の光デバイス。

要約書

信号光を入出射させる際の結合が容易で損失が小さいシート状マルチモード光伝送路を備え、シングルモードによる信号光の伝送と同等の10 Gbps程度の高速伝送が可能である光デバイスを提供する。外部から入力される入力信号を信号光により処理して所望の出力信号を生成し、出力する光デバイスであって、長さ方向及び幅方向に広がるシート状であり、長さ方向及び幅方向の両方向に直交する厚さ方向に最大屈折率部分を有し、該最大屈折率部分からの厚さ方向に沿って離れるに従って屈折率が増加しない屈折率分布を含む。光デバイスは、入力信号に対応する信号光を入射光として入射させ、入射光を幅方向に複数の固有モードを持つマルチモードで長さ方向に伝送するとともに、入射光から出射光を生成し、出射光を出力信号に対応する信号光として出射するマルチモード光伝送路を備える。マルチモード光伝送路の出射光は、固有モードが長さ方向に沿って相互に干渉することにより生成される。

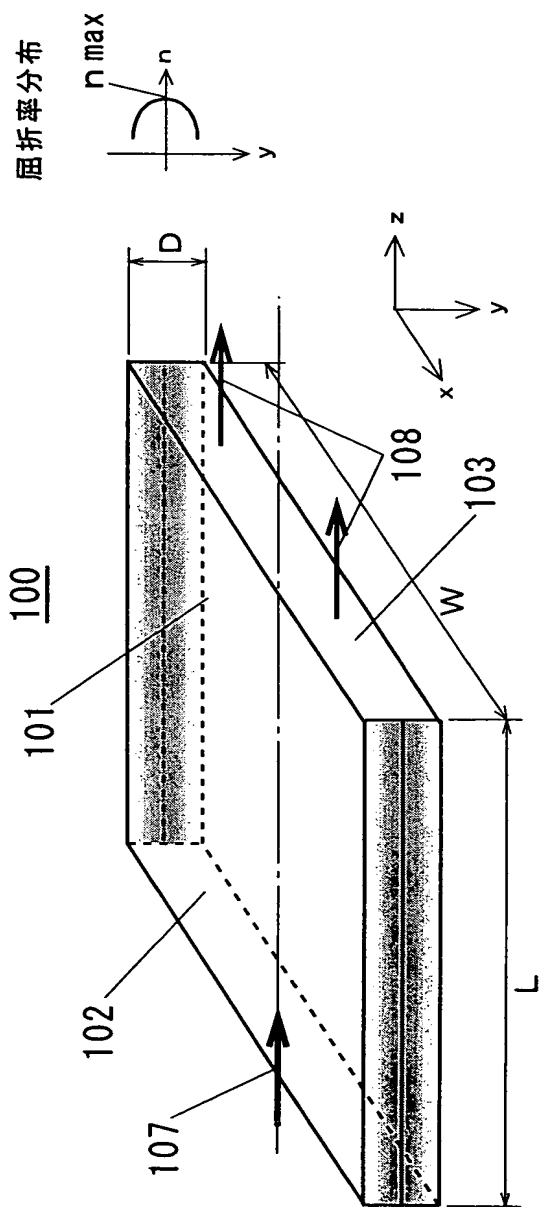


Fig. 1A

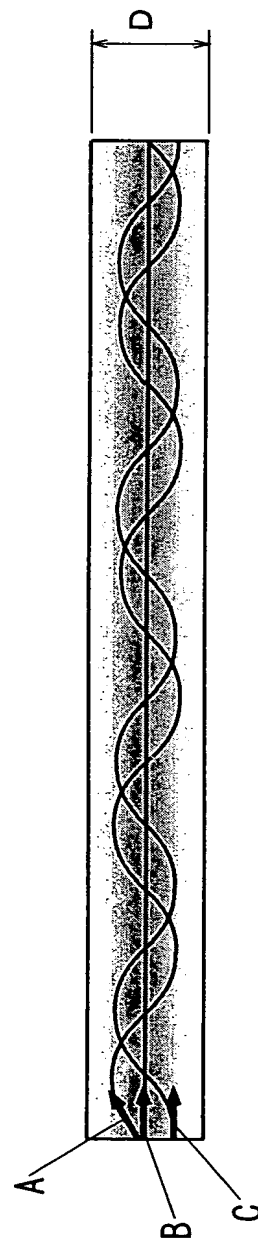
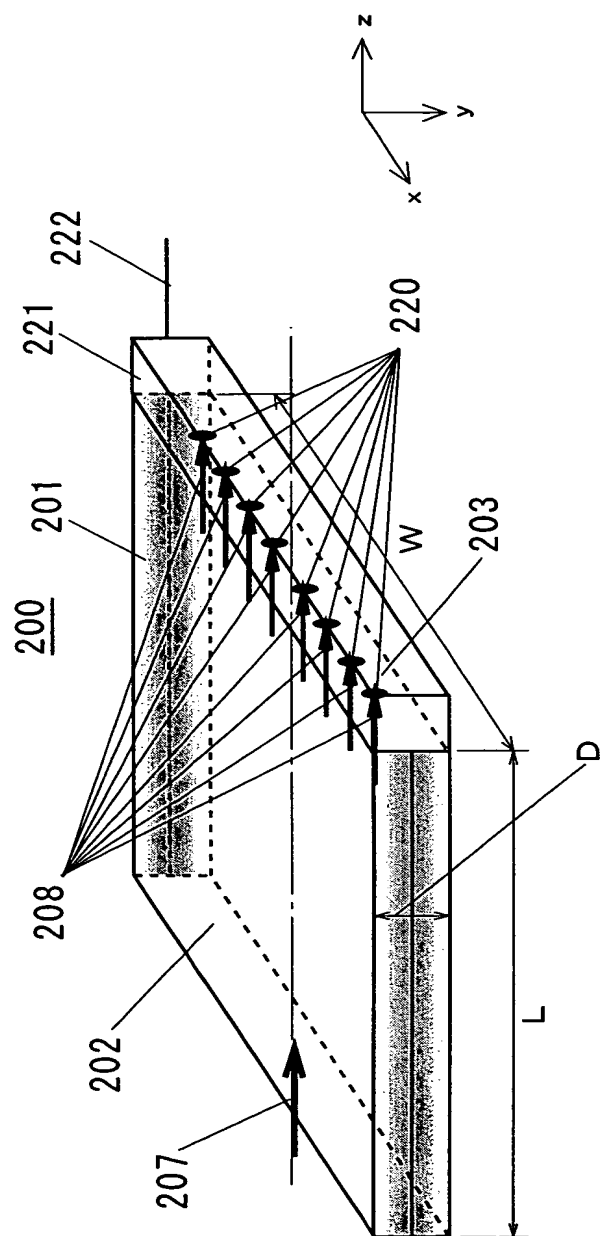


Fig. 1B



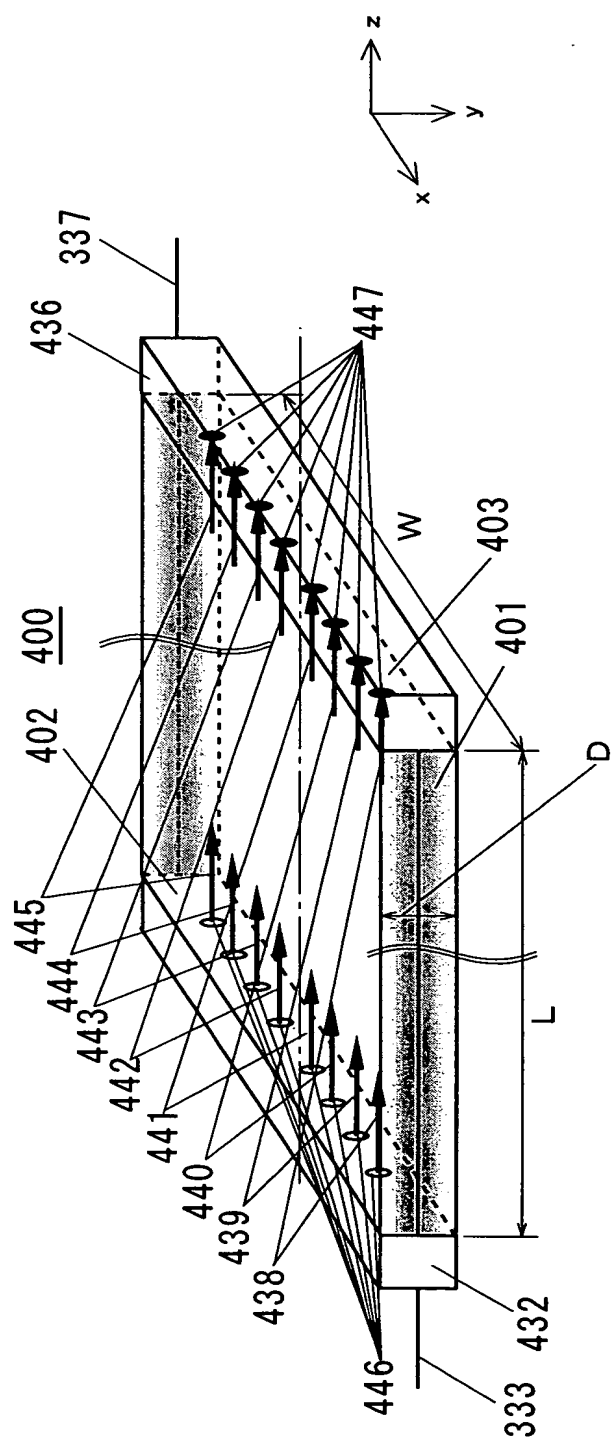


Fig.4

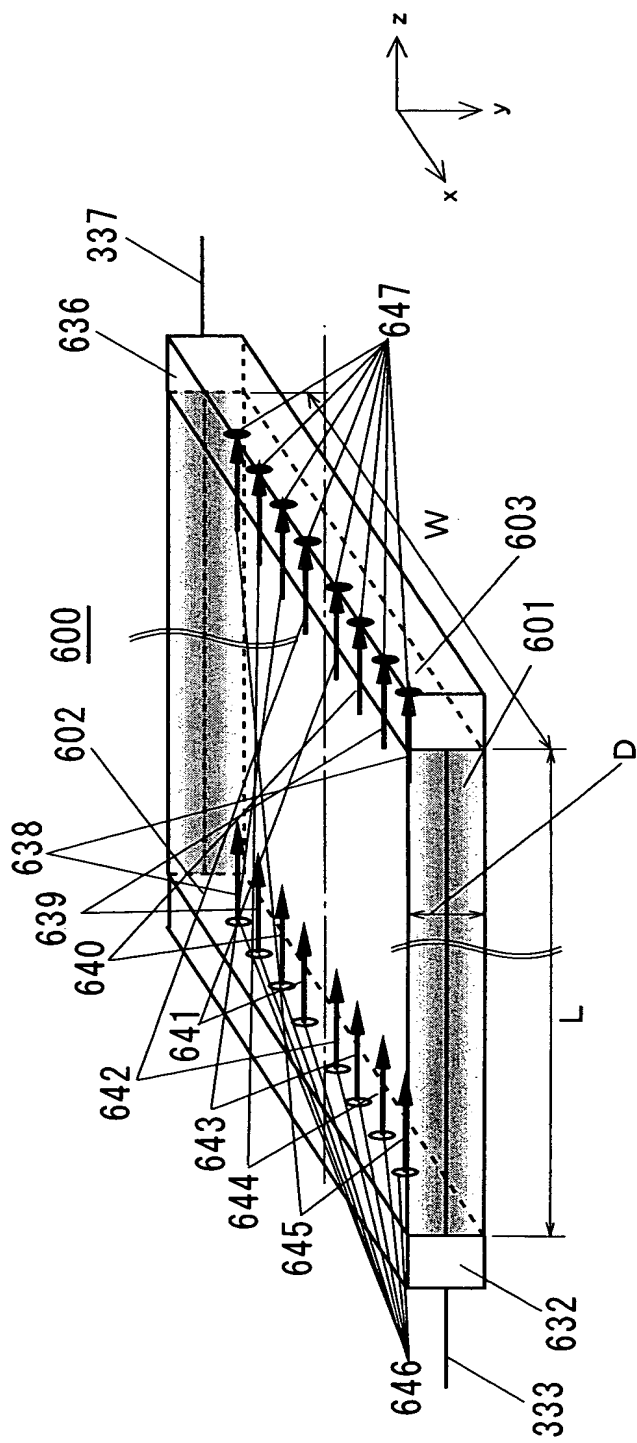


Fig.6

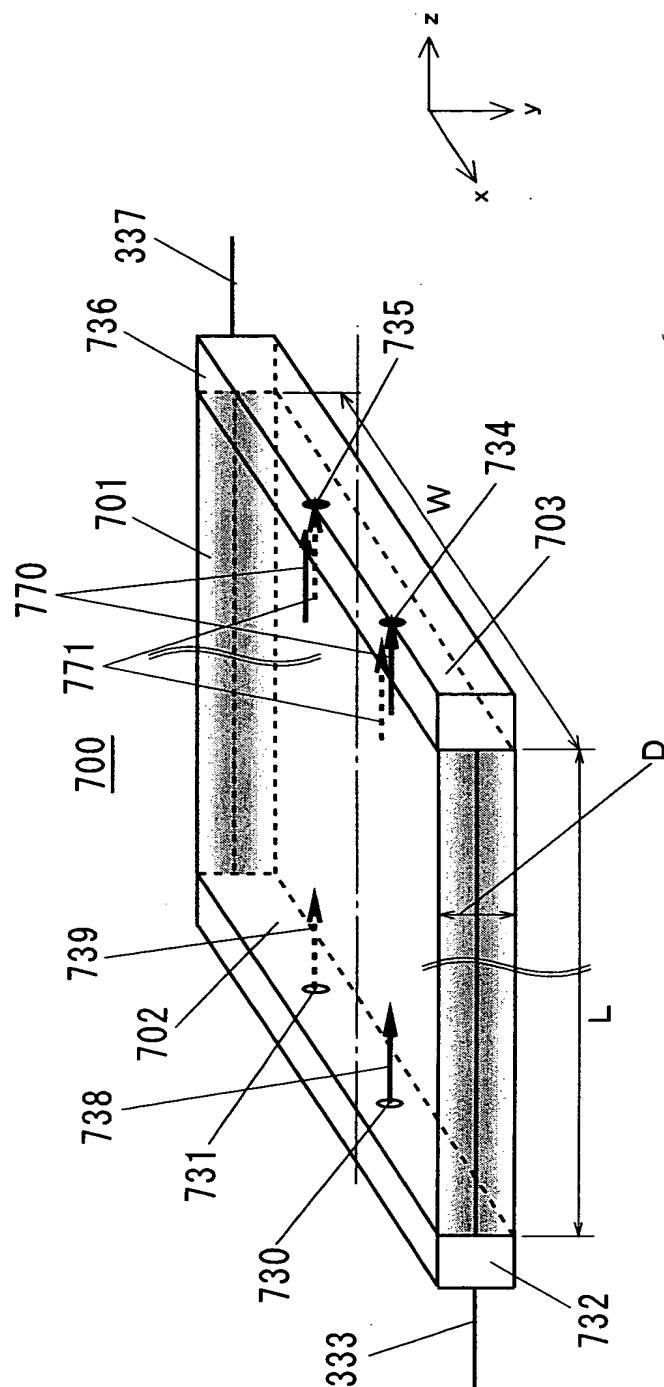
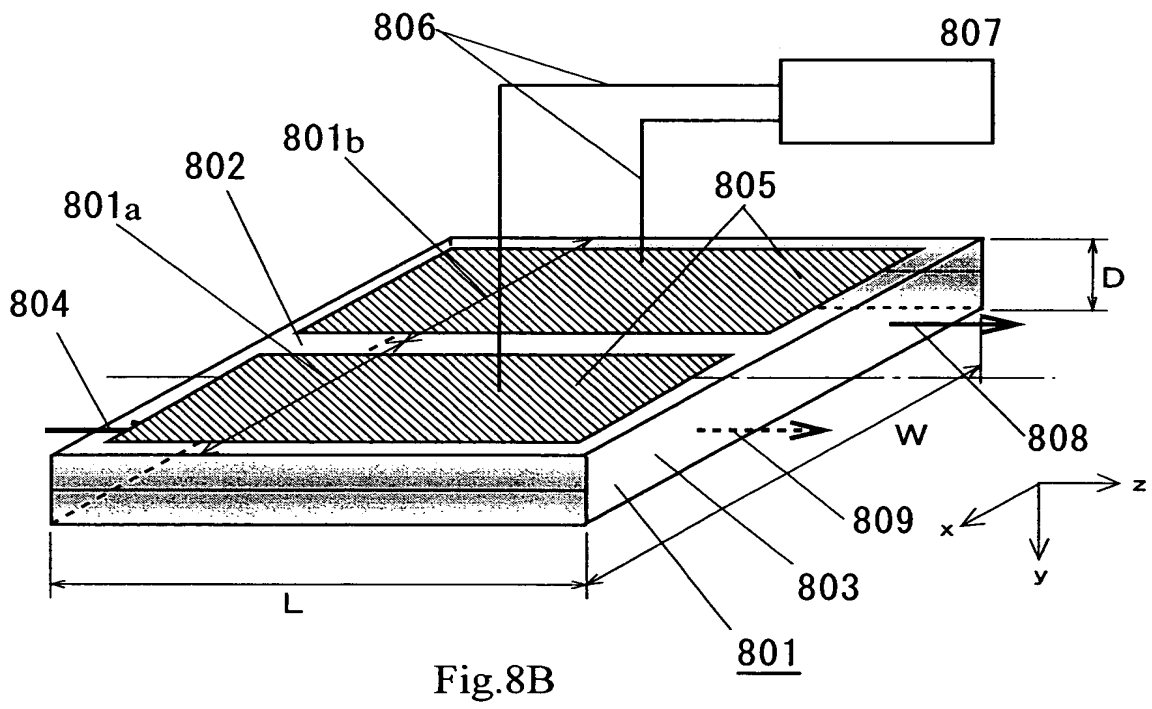
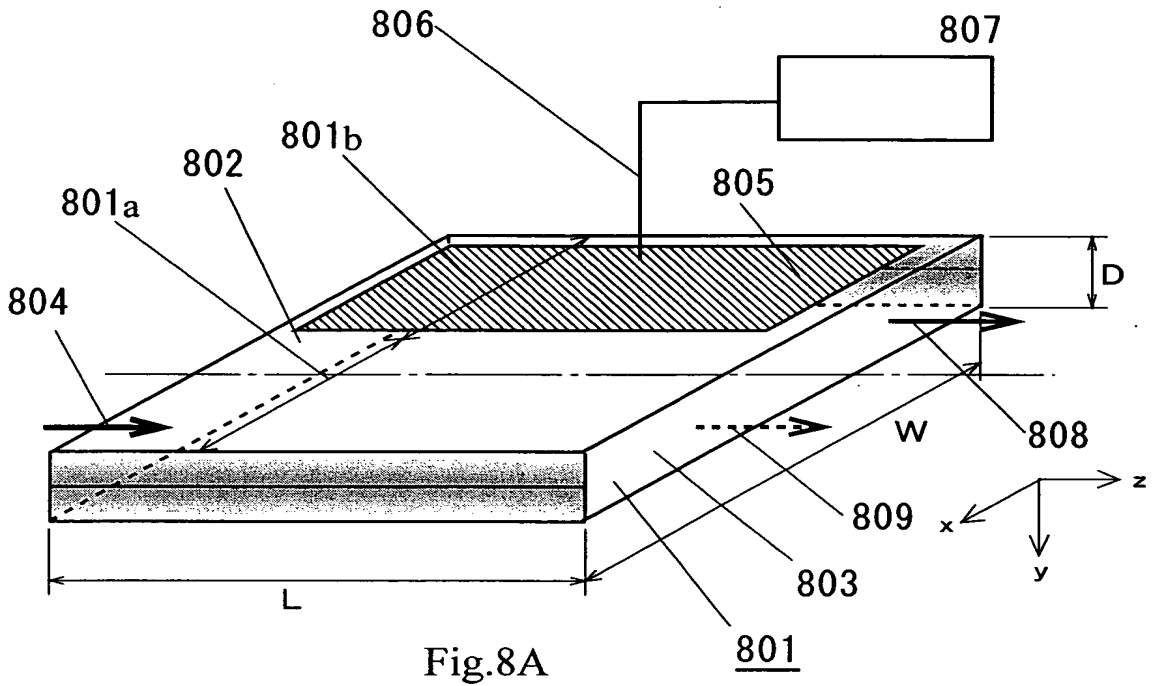


Fig.7



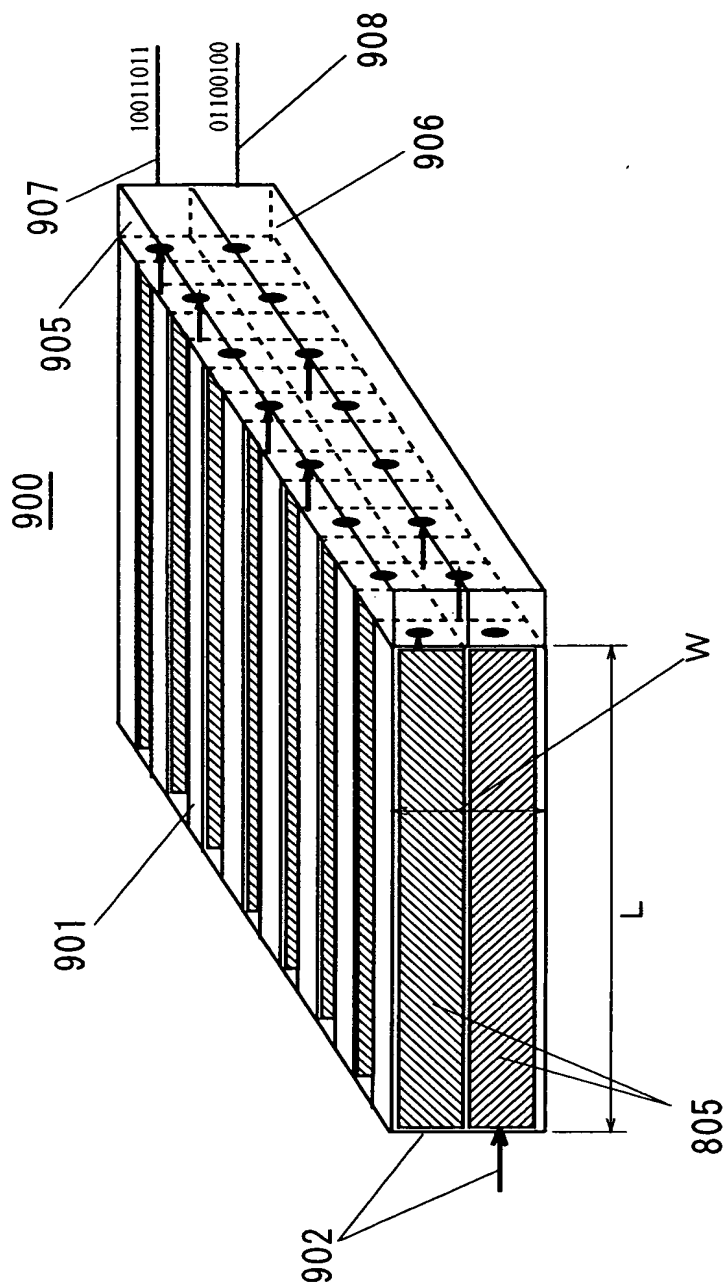


Fig.9

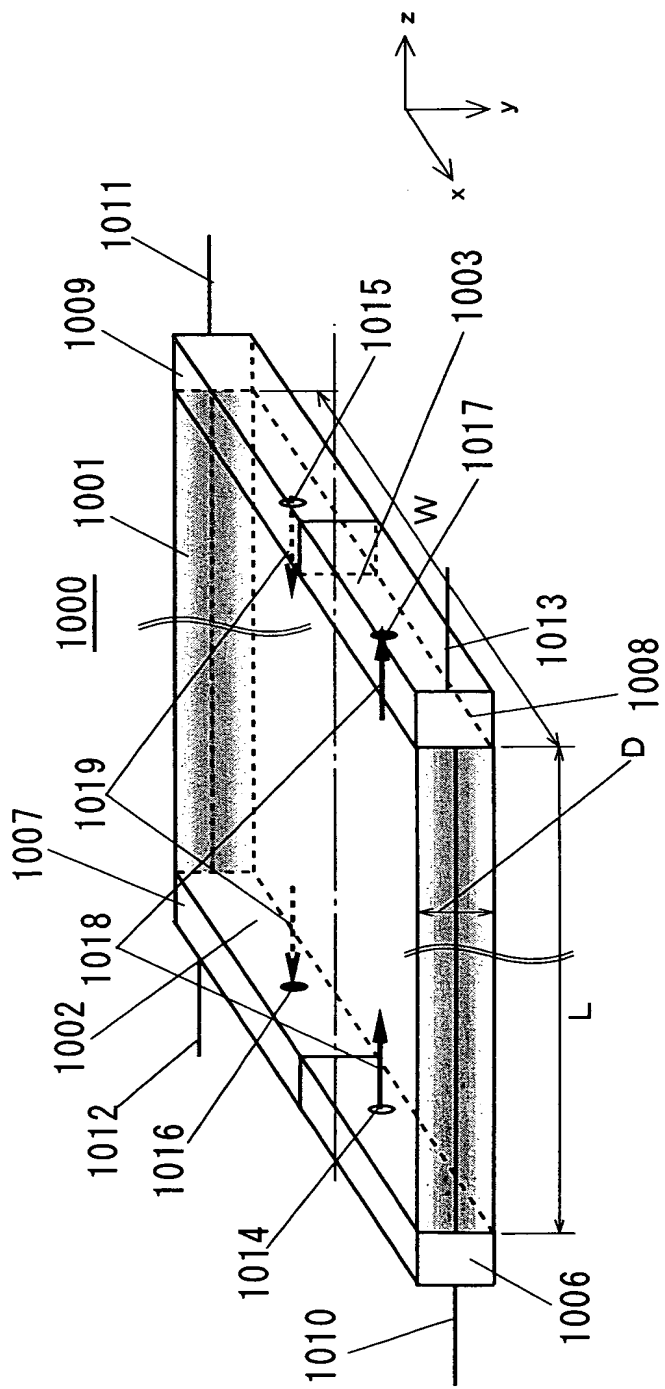


Fig.10

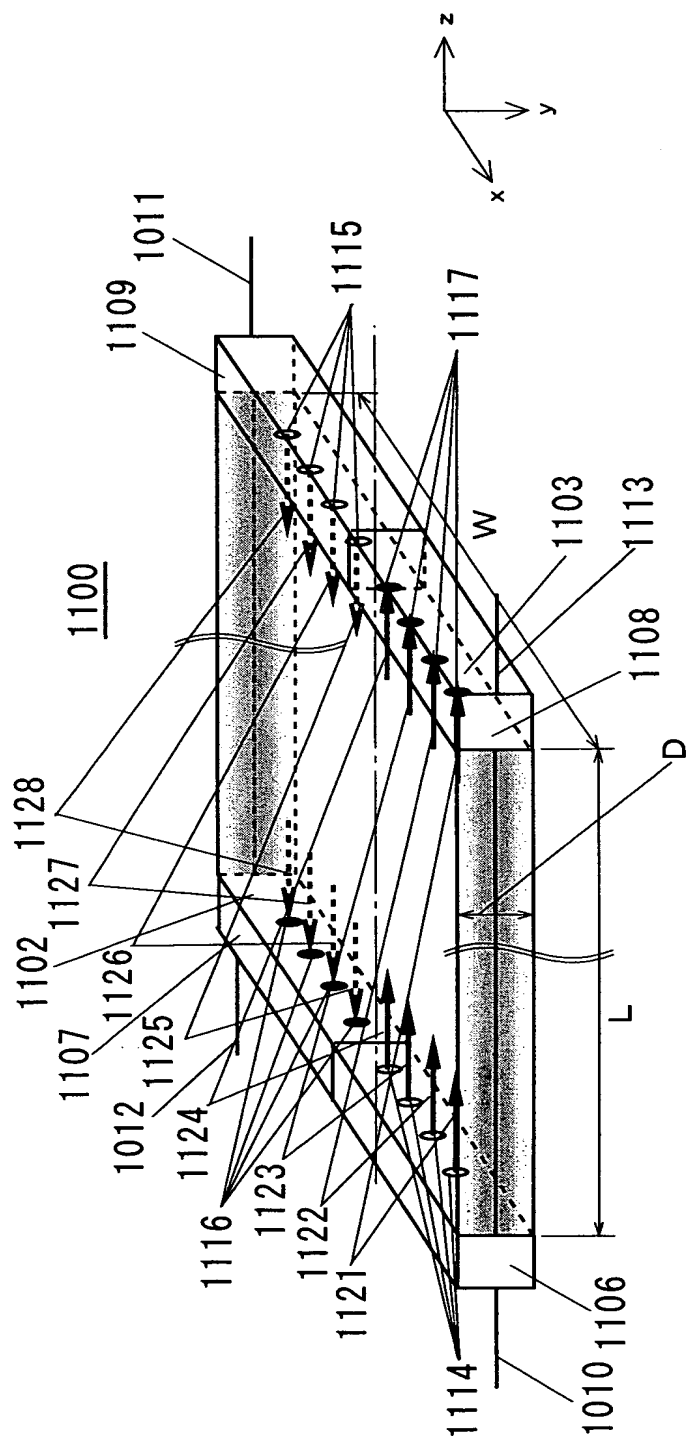


Fig.11

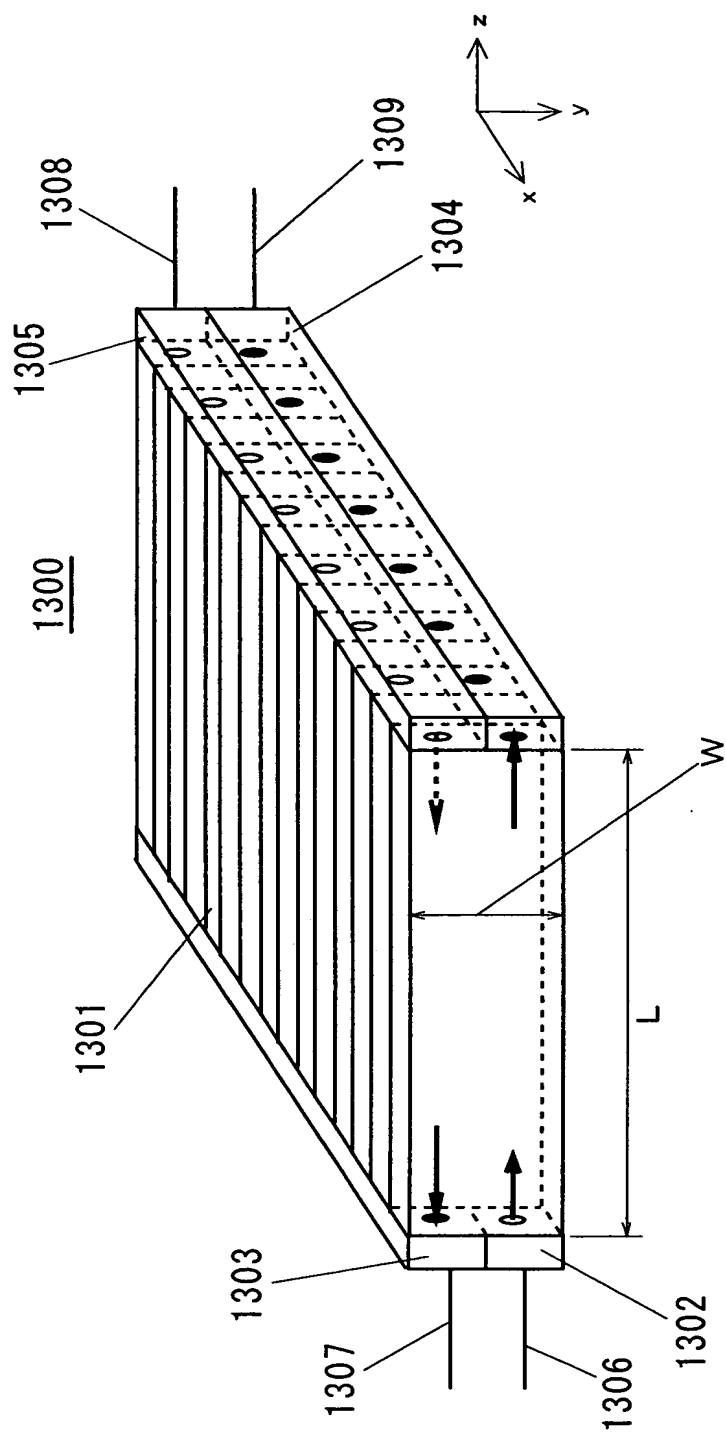


Fig.13

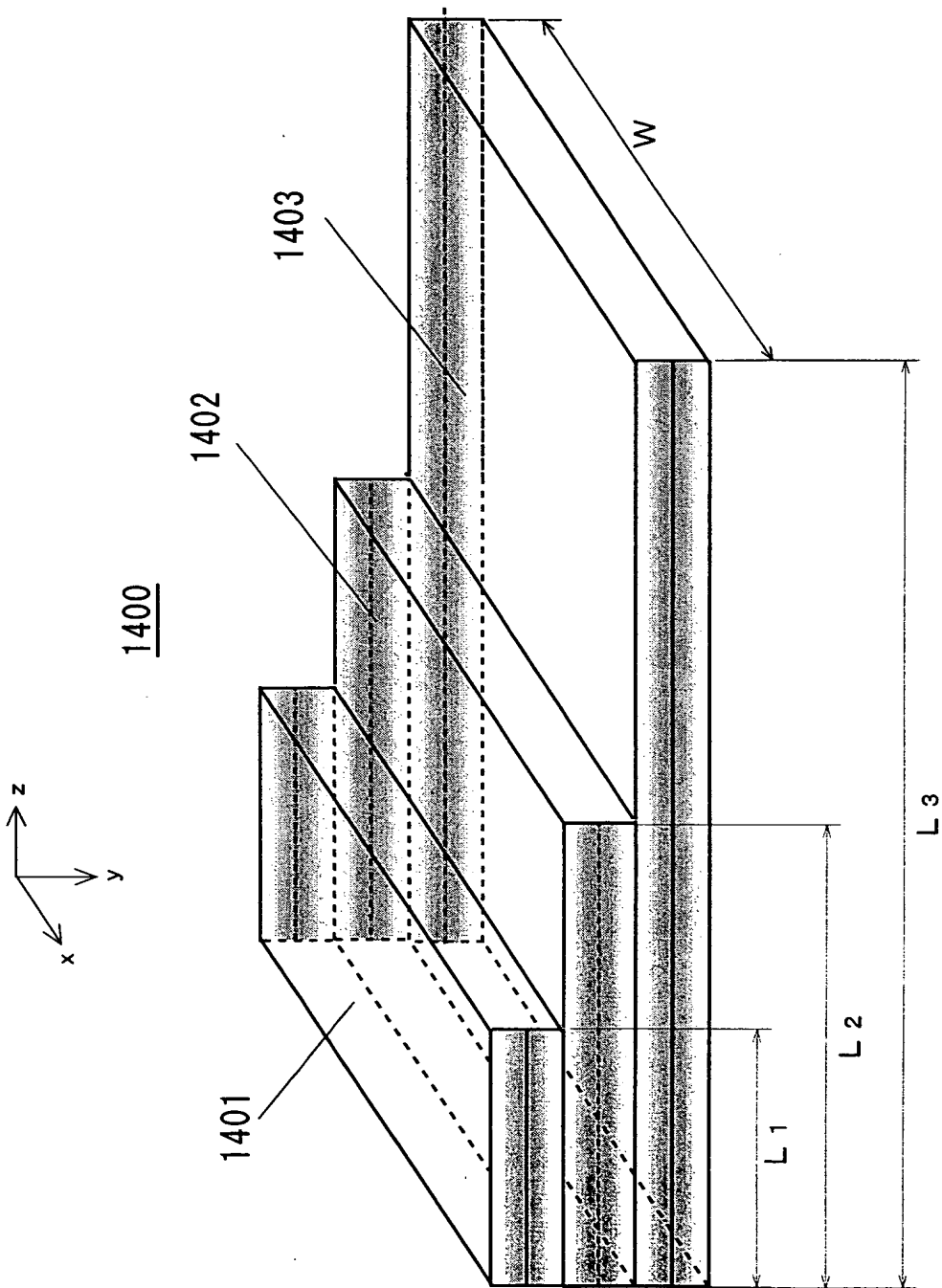
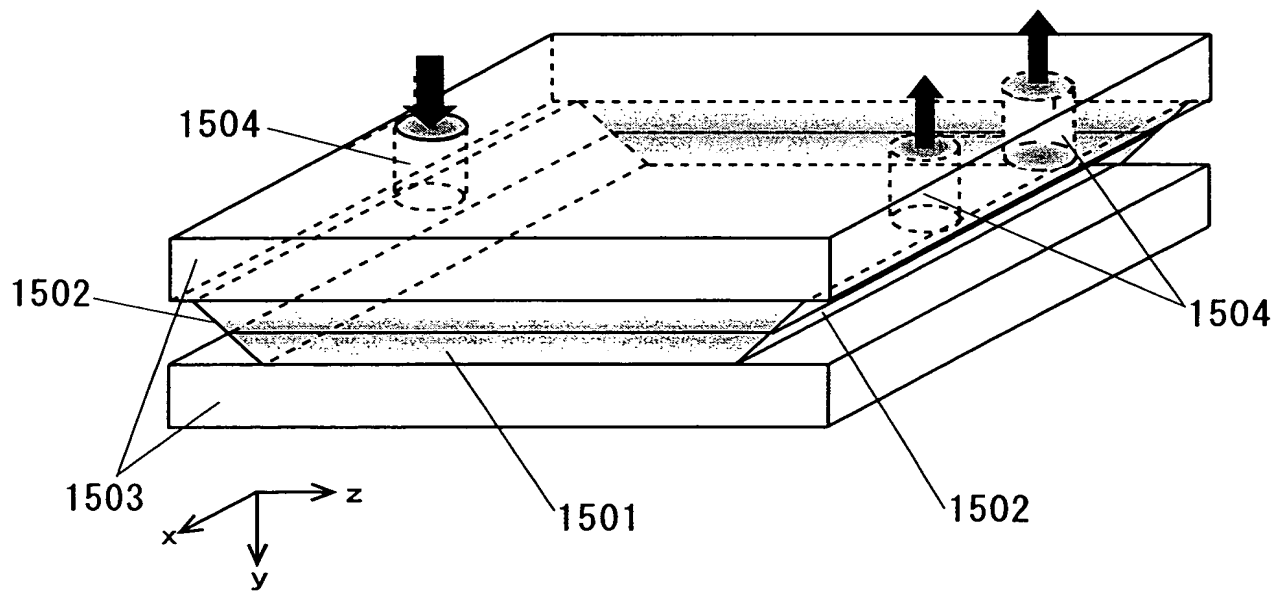
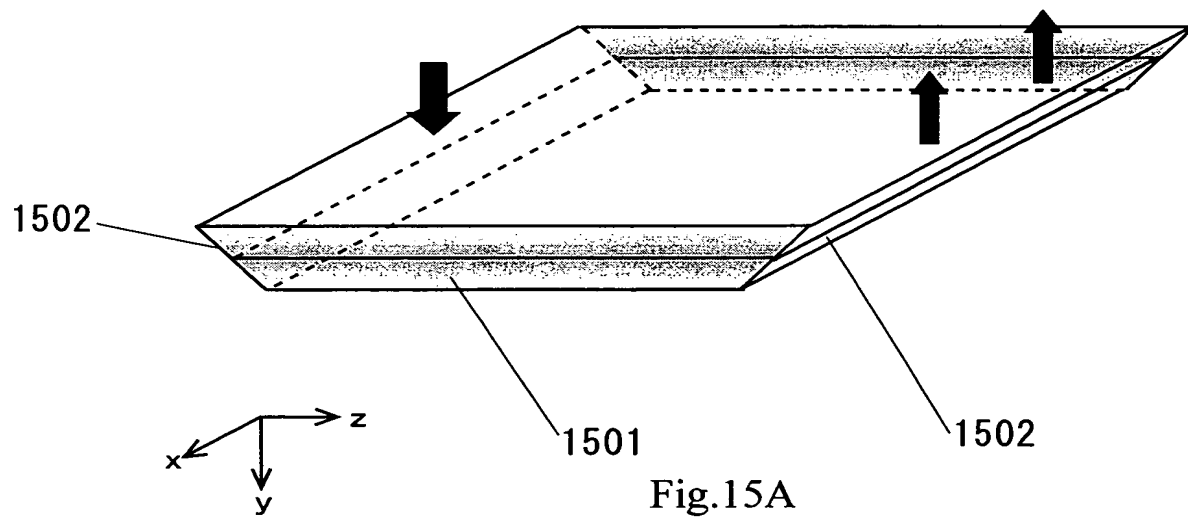


Fig.14



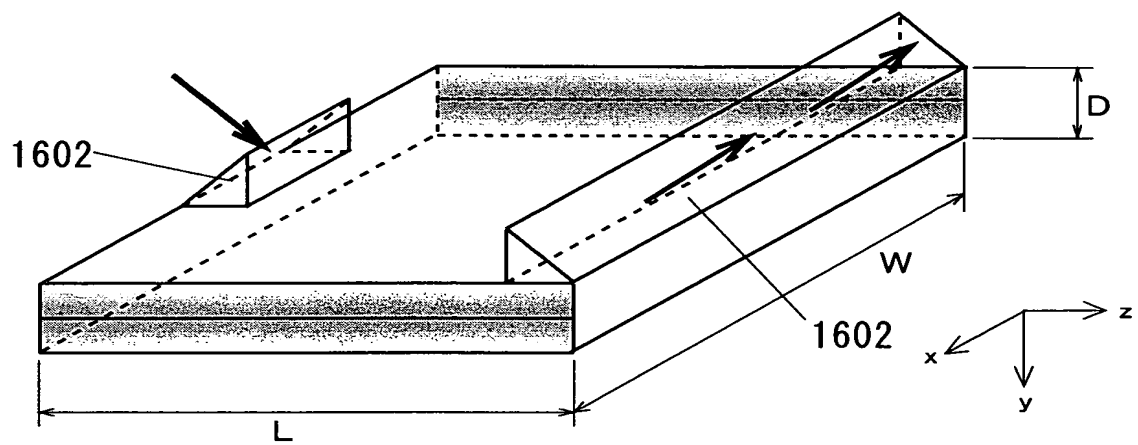


Fig.16

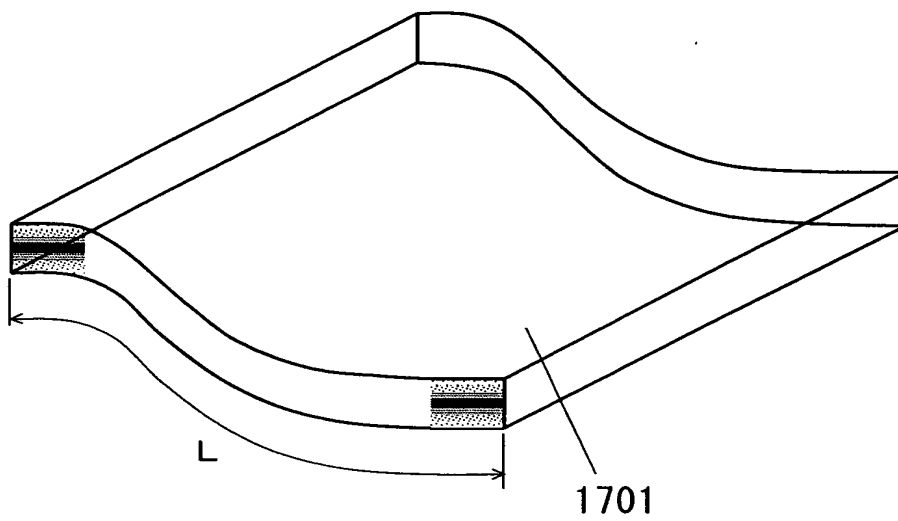


Fig.17A

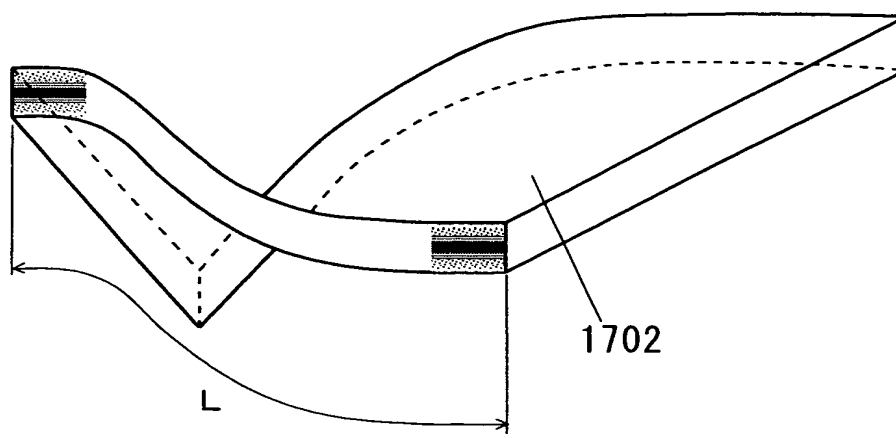


Fig.17b

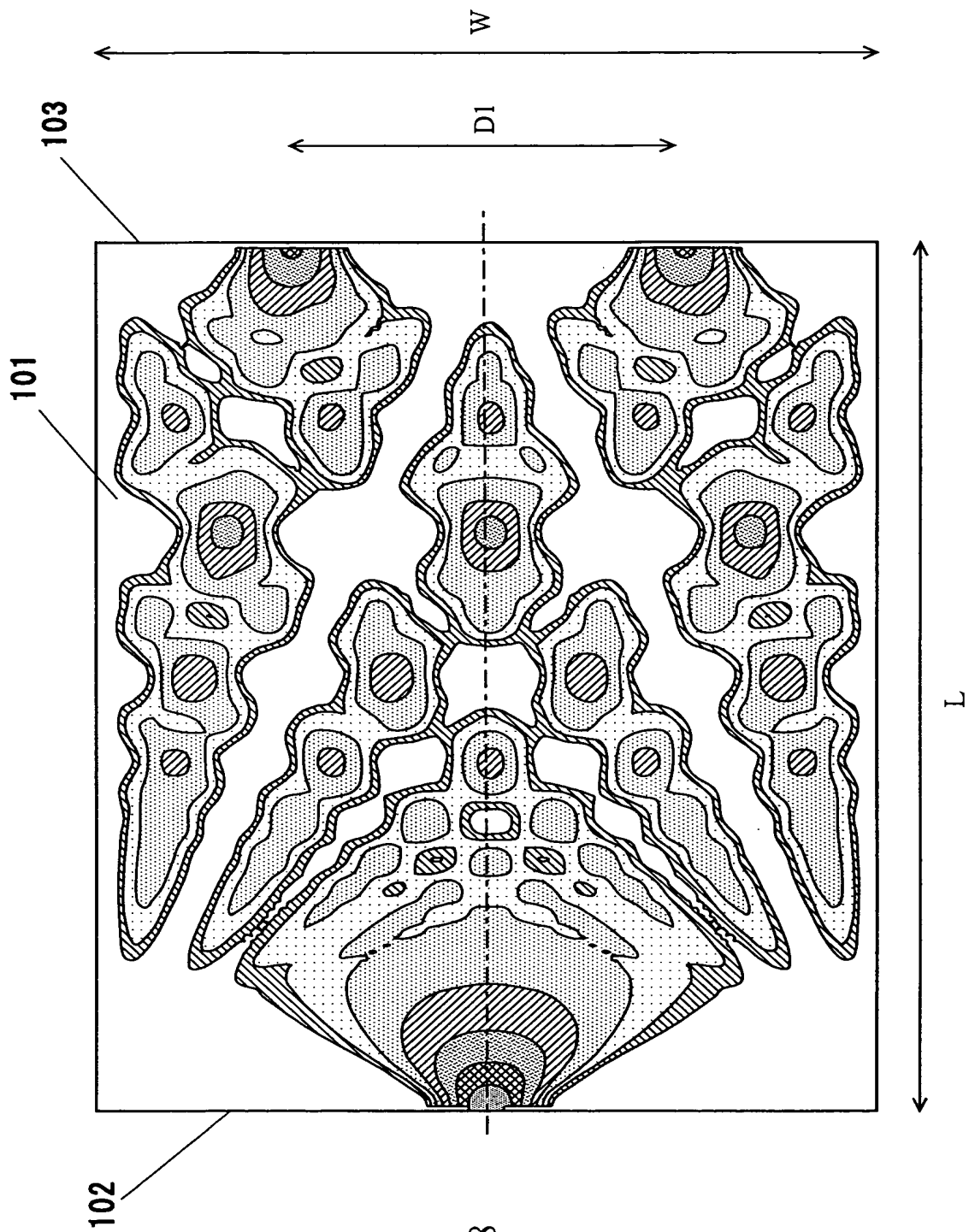


Fig.18

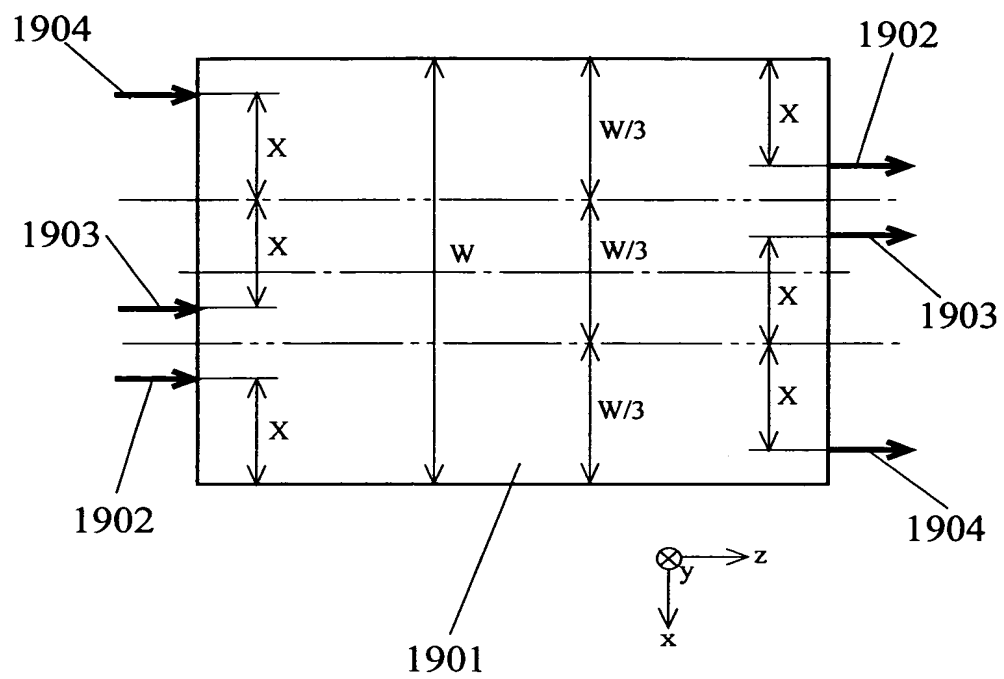
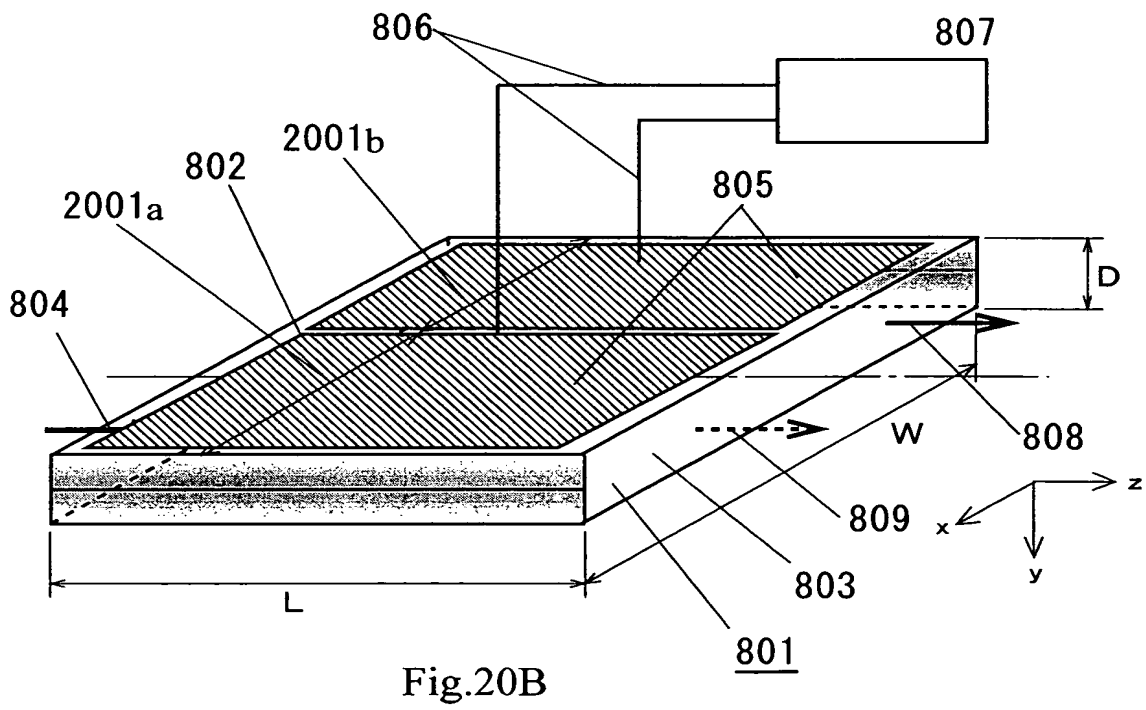
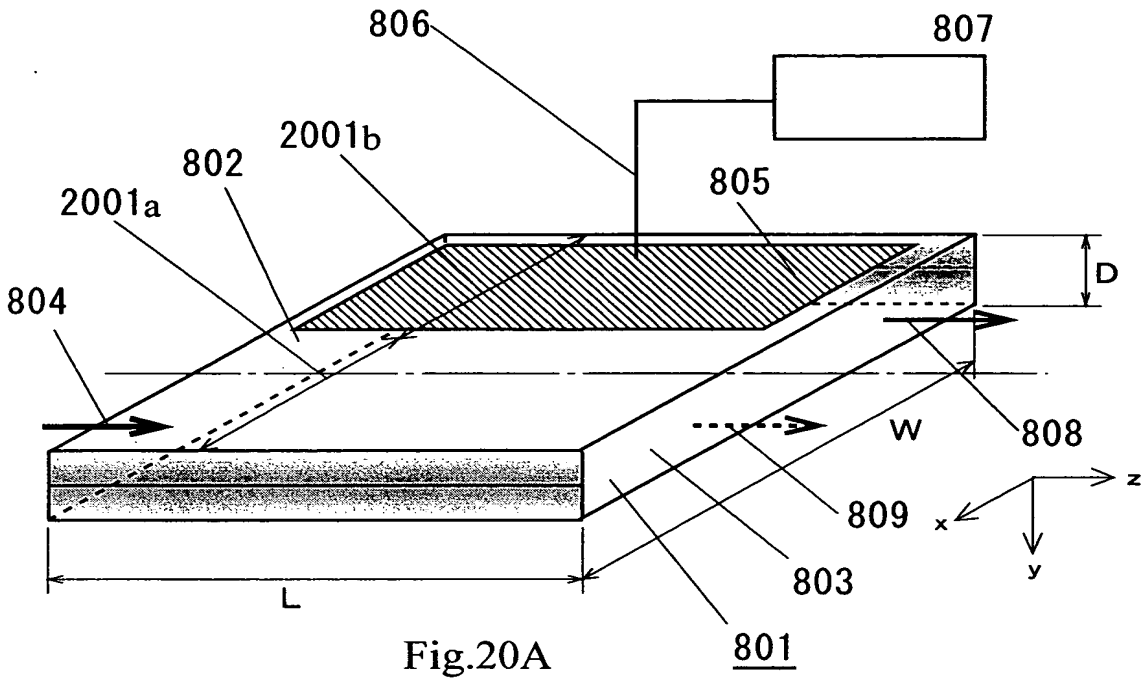


Fig.19



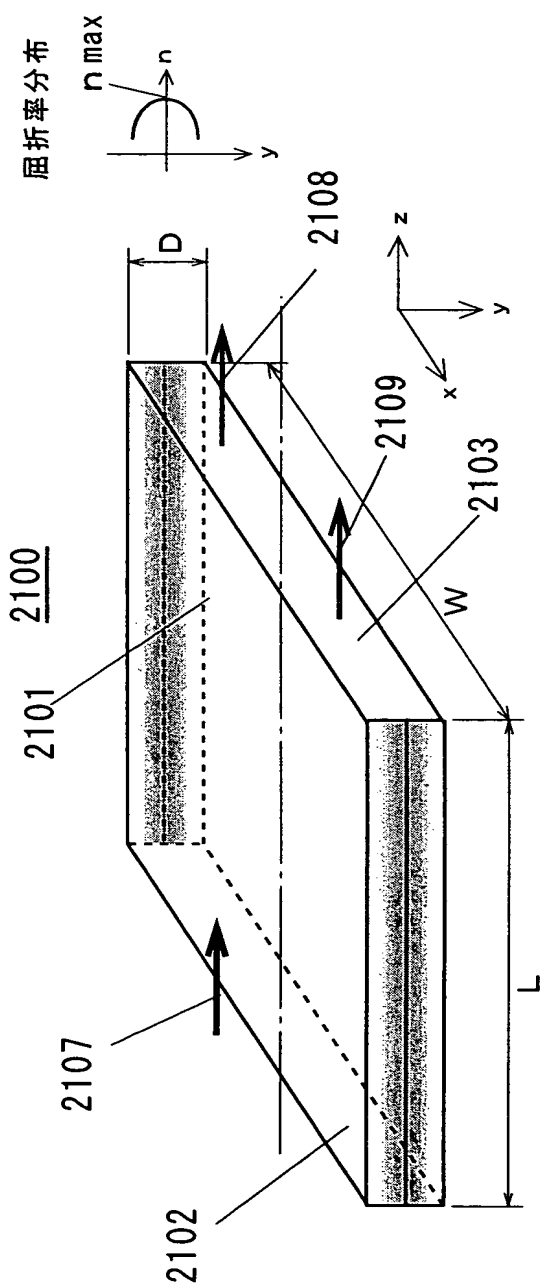


Fig.21A

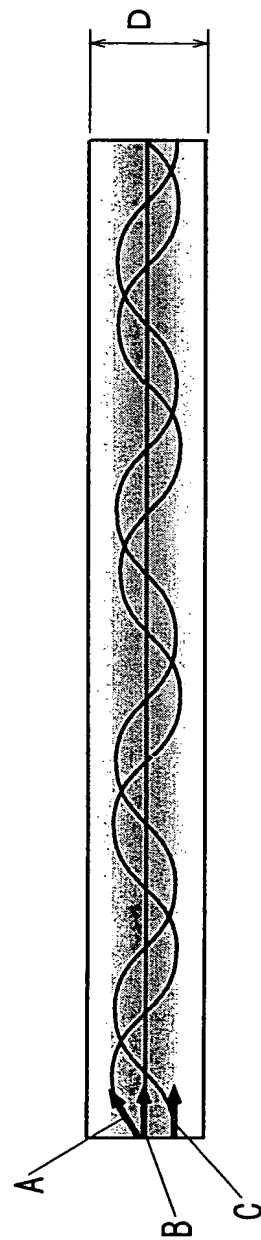
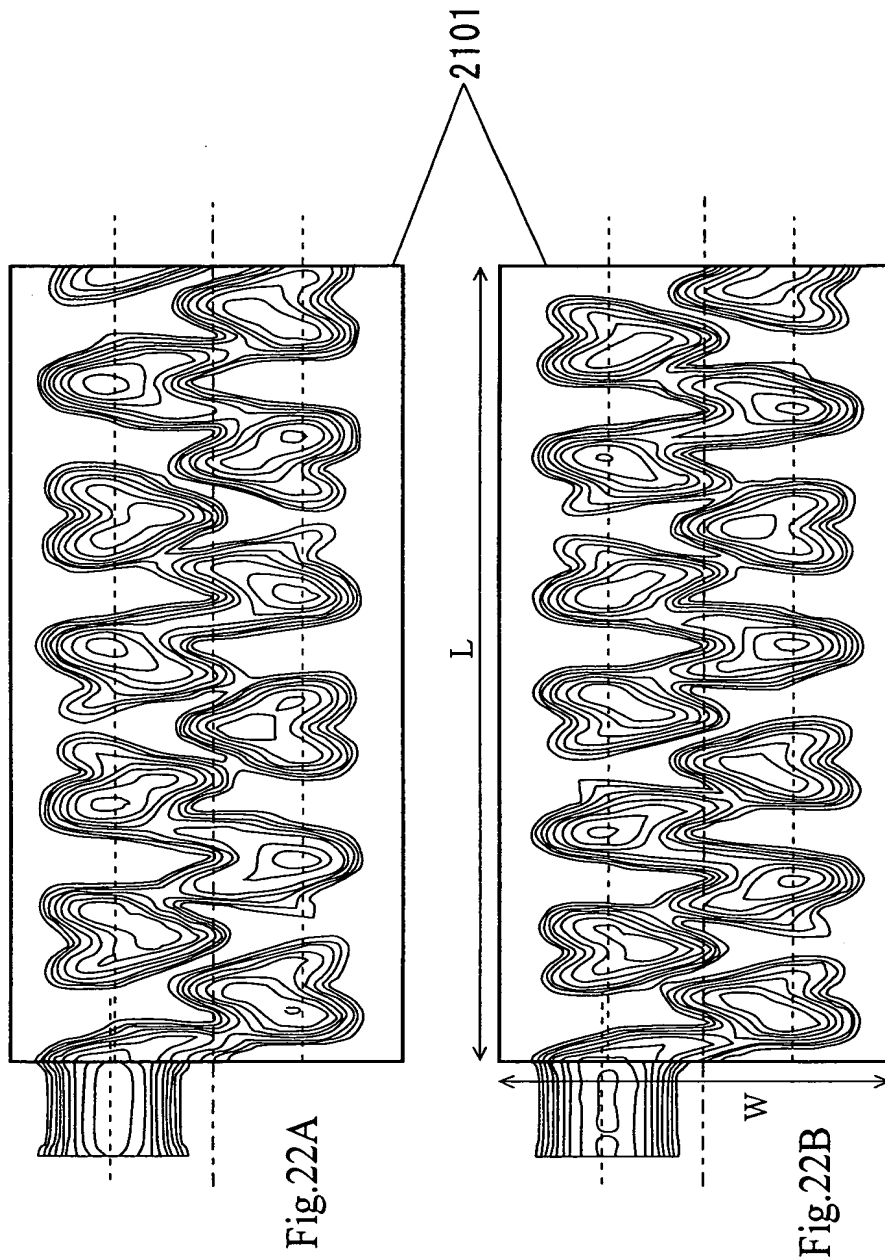


Fig.21B



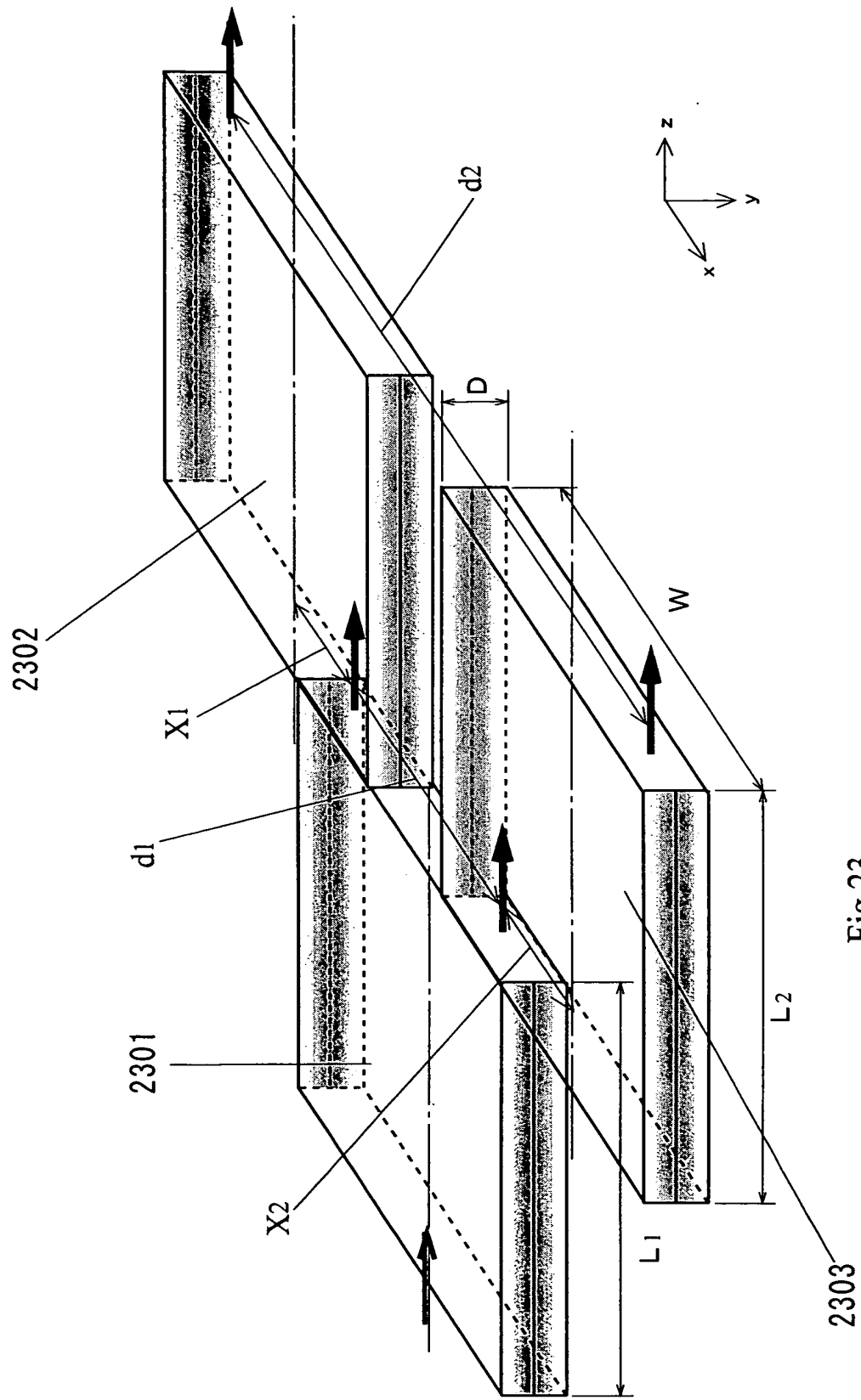


Fig.23

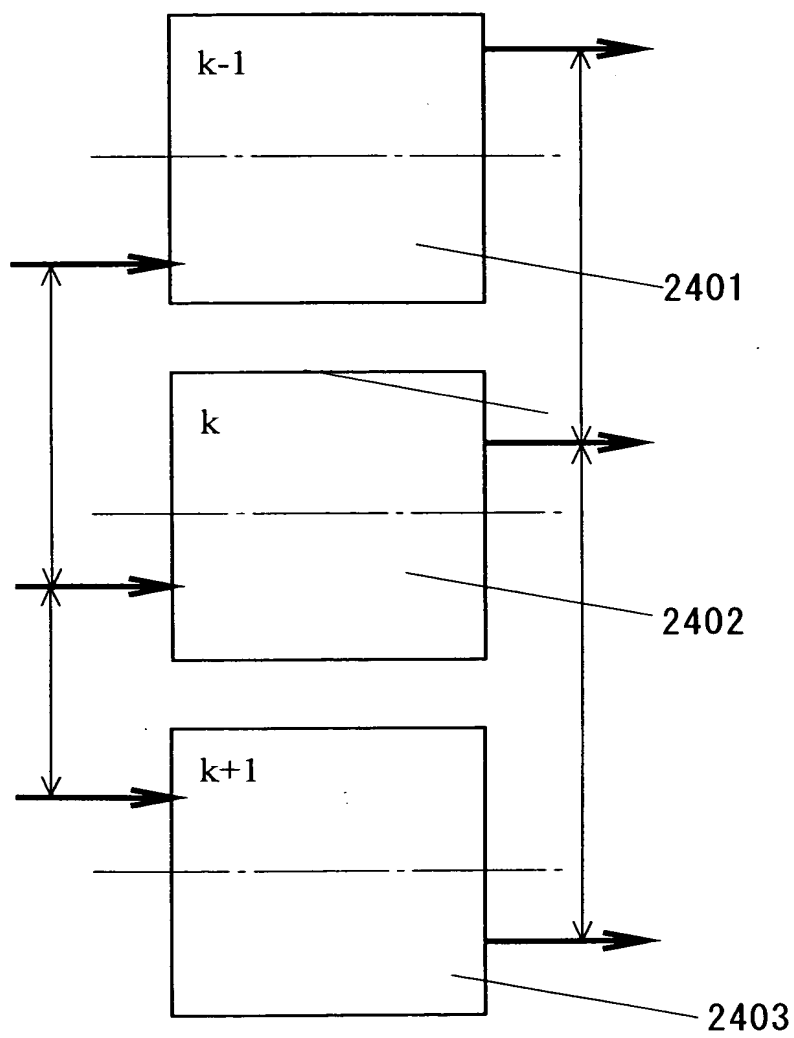


Fig.24

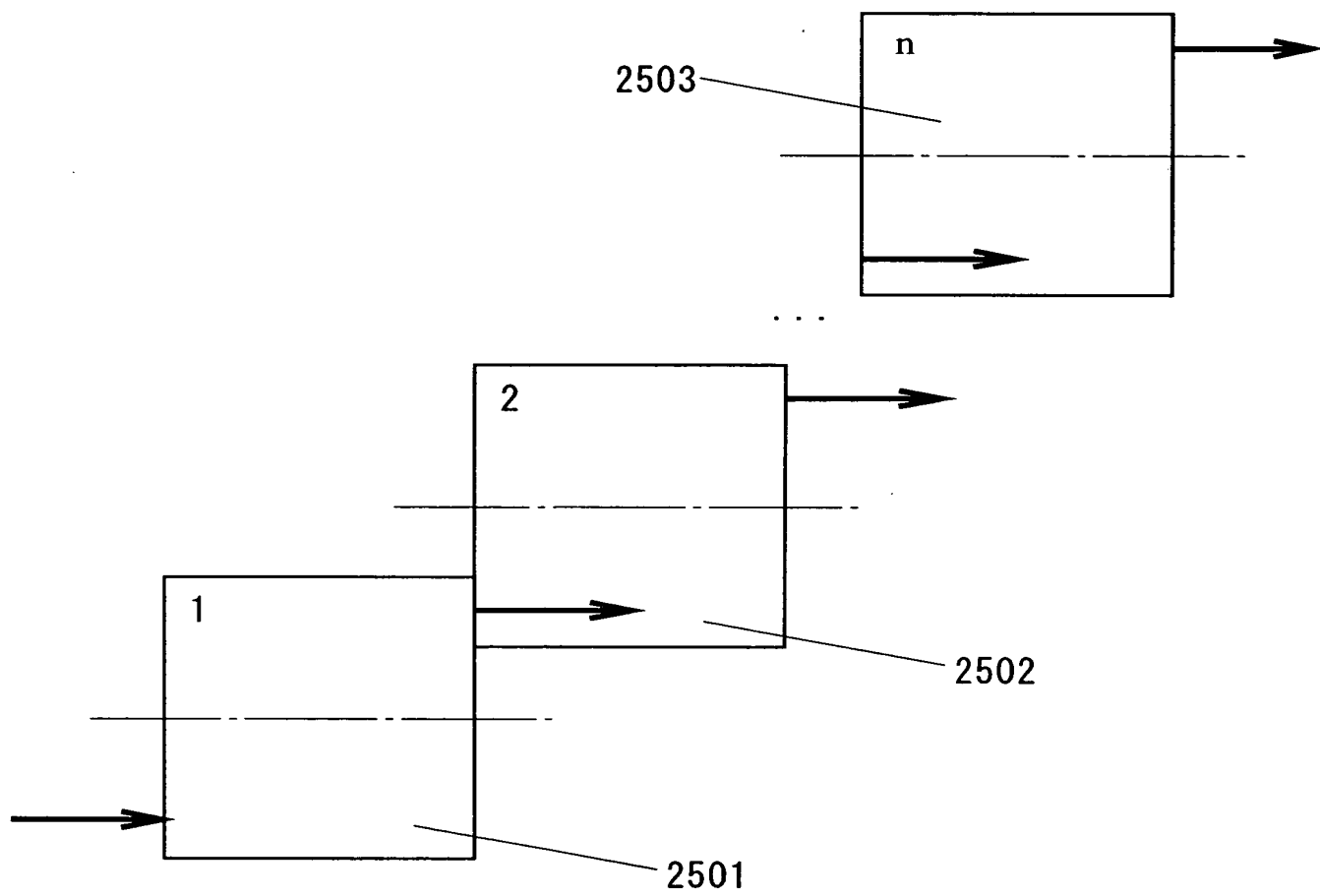


Fig.25

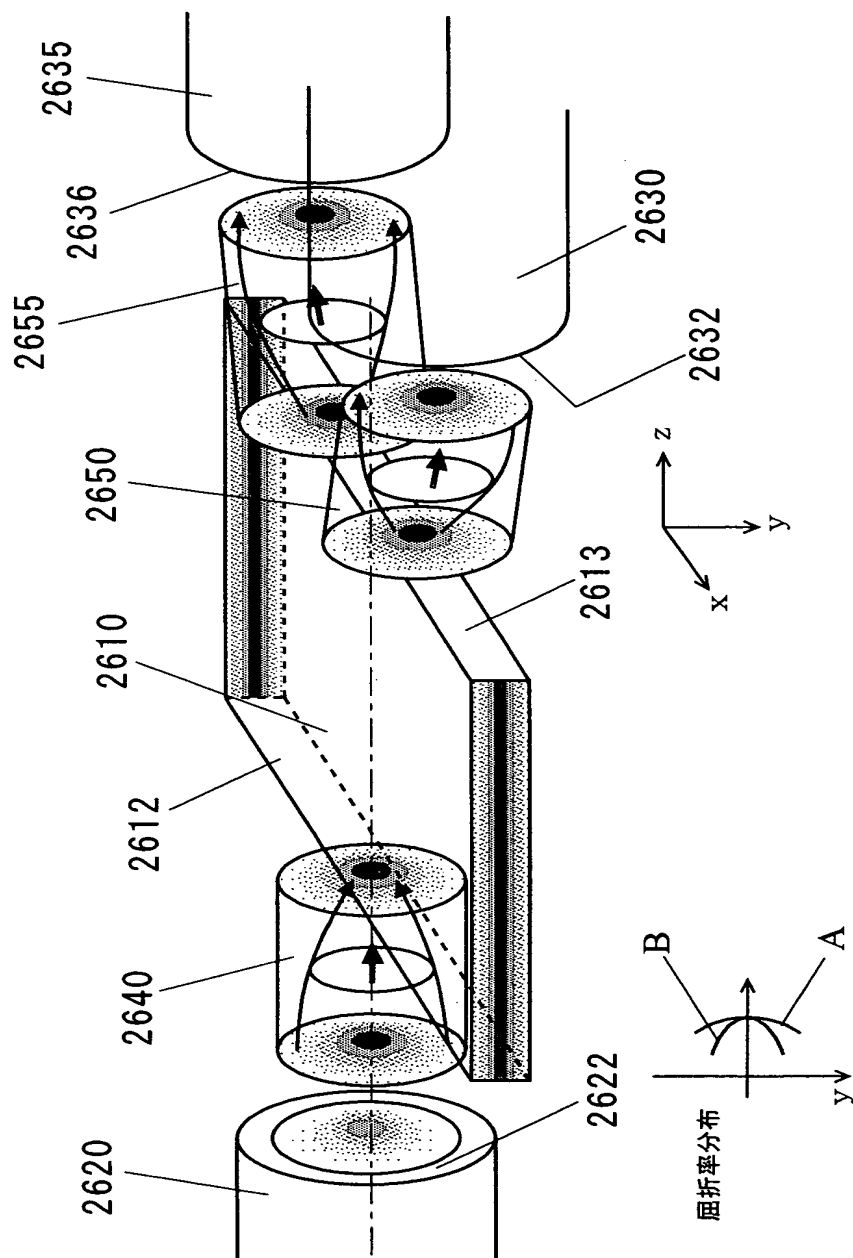


Fig.26

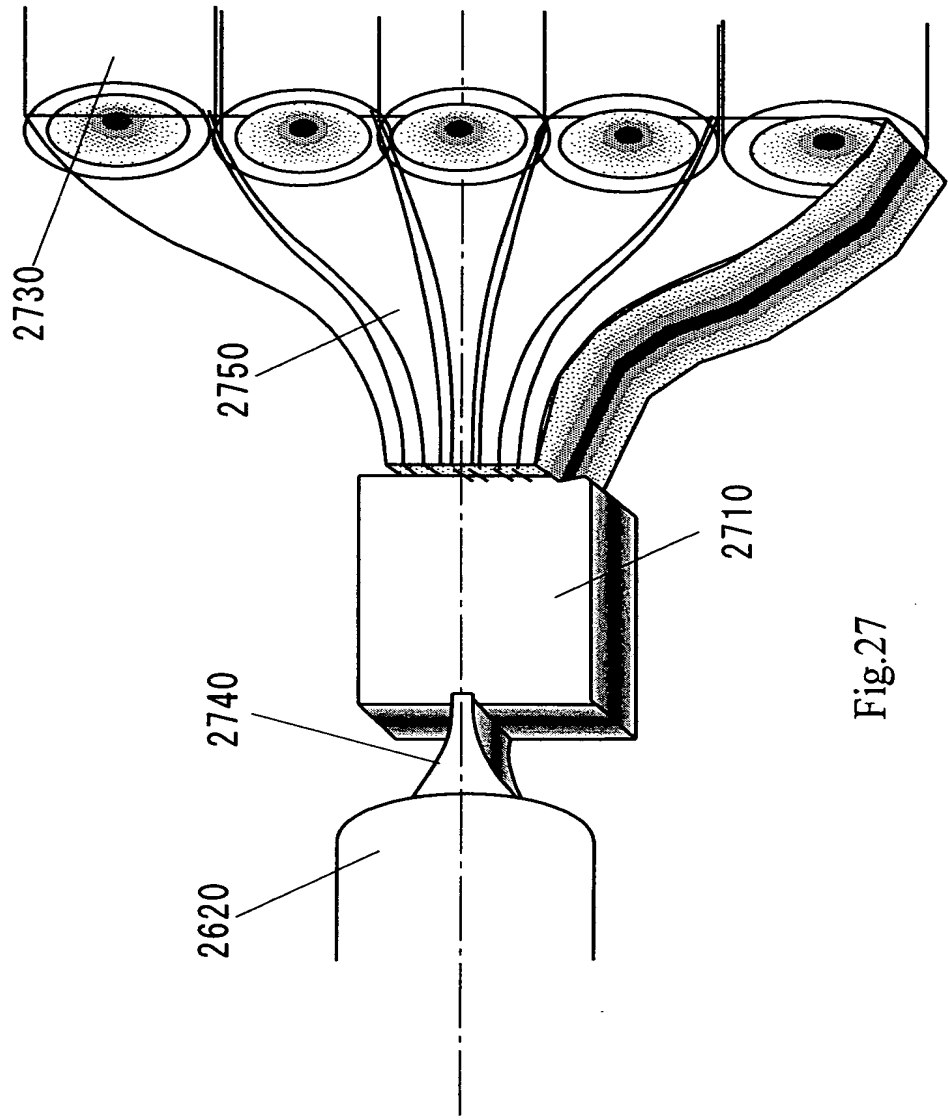


Fig.27

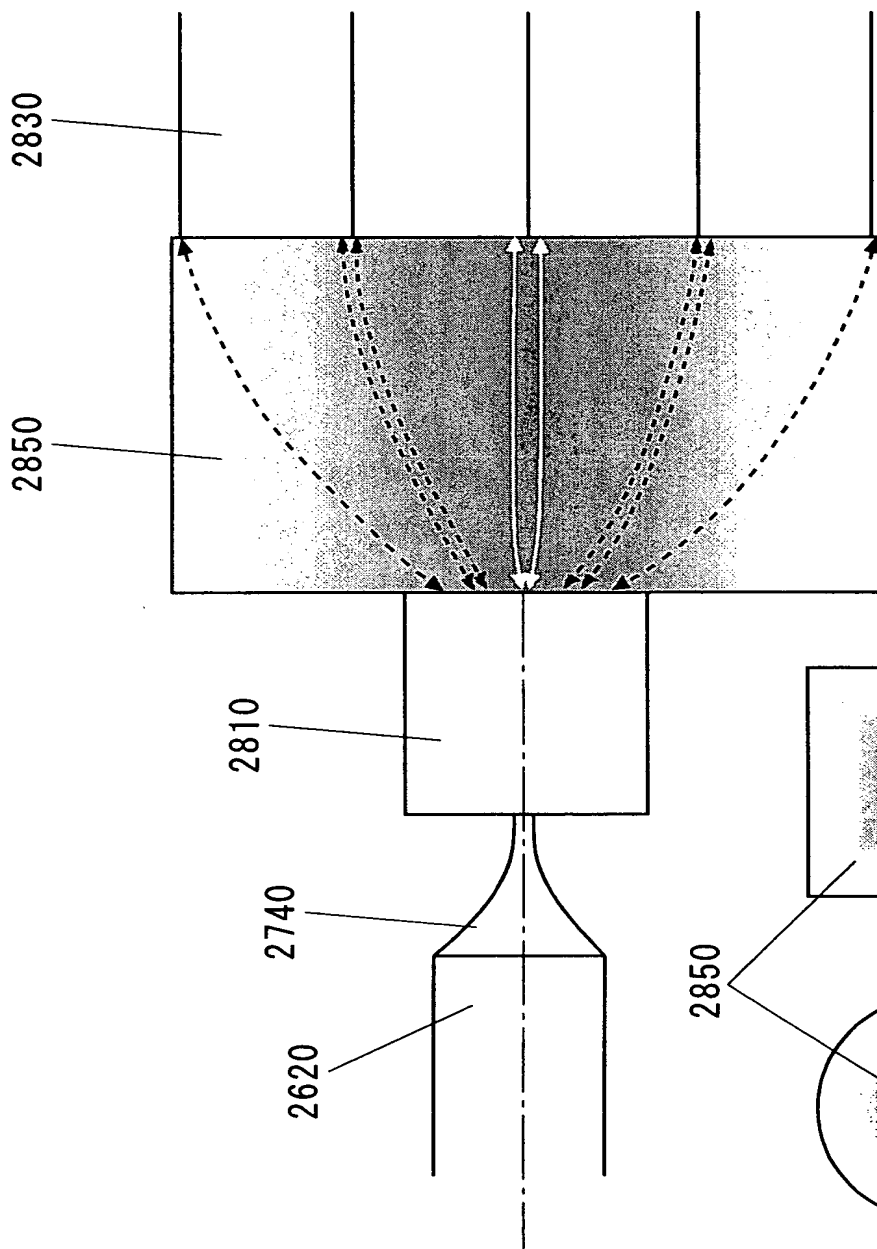


Fig.28A

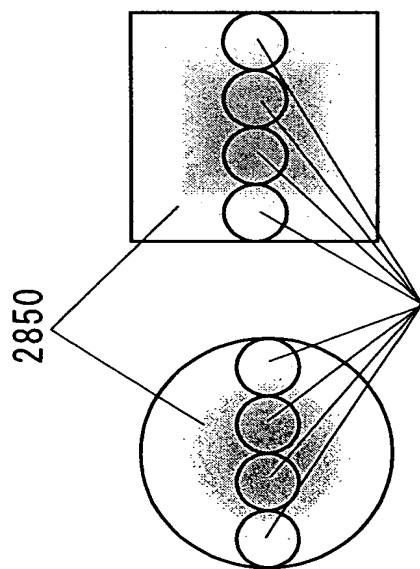


Fig.28B Fig.28C

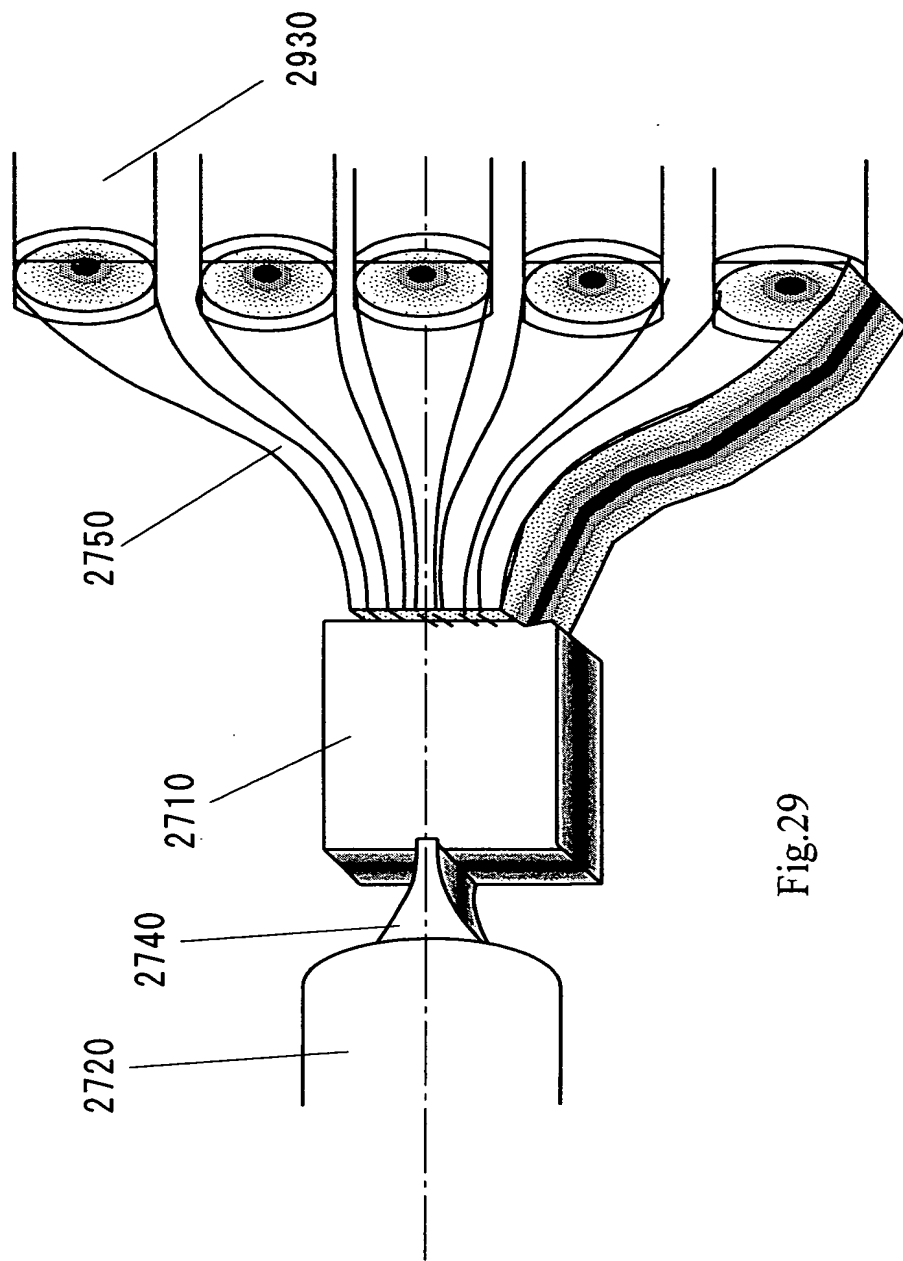


Fig.29

Fig.30A

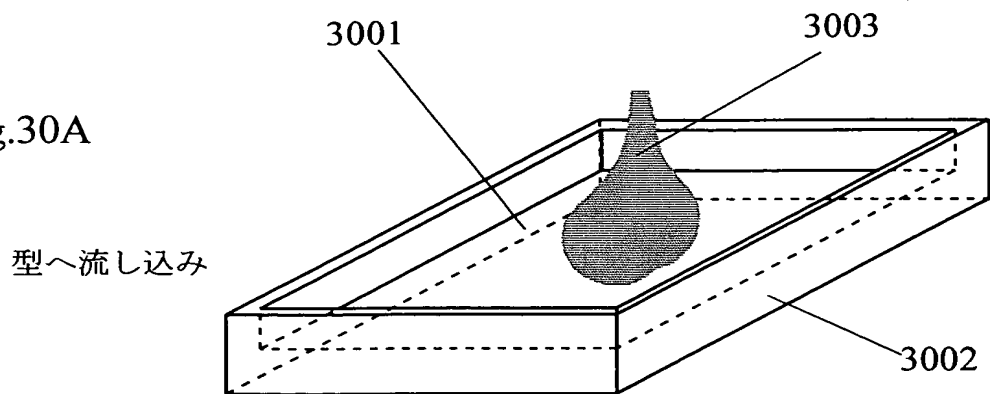


Fig.30B

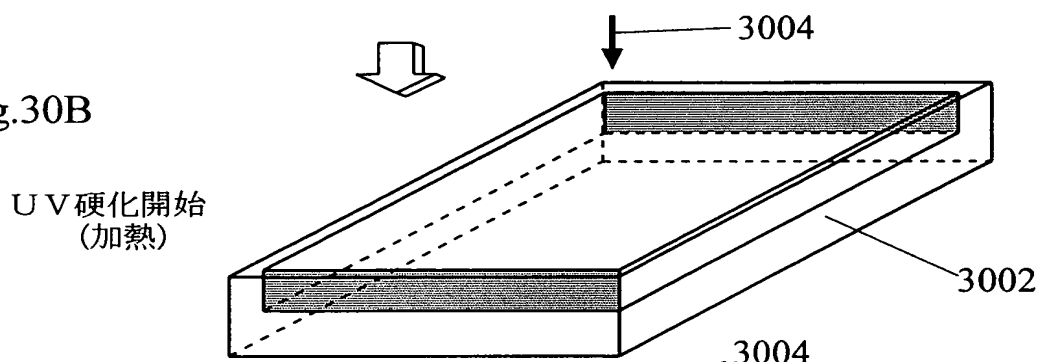


Fig.30C

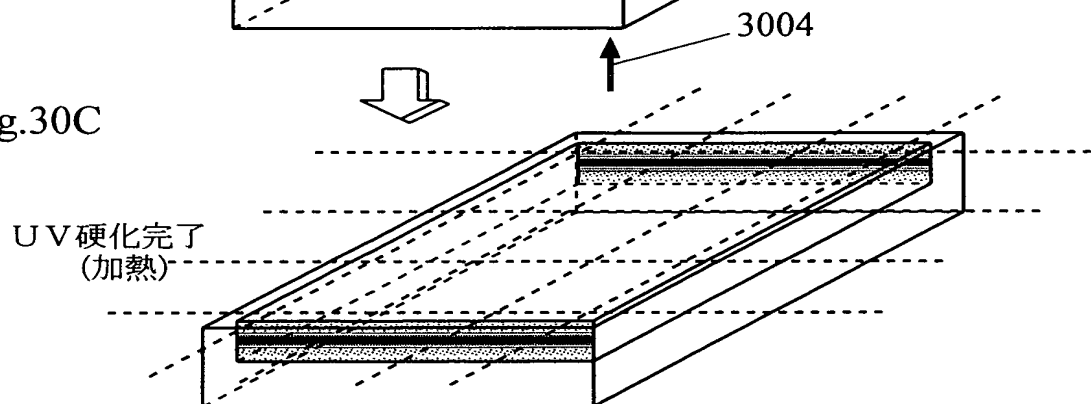


Fig.30D

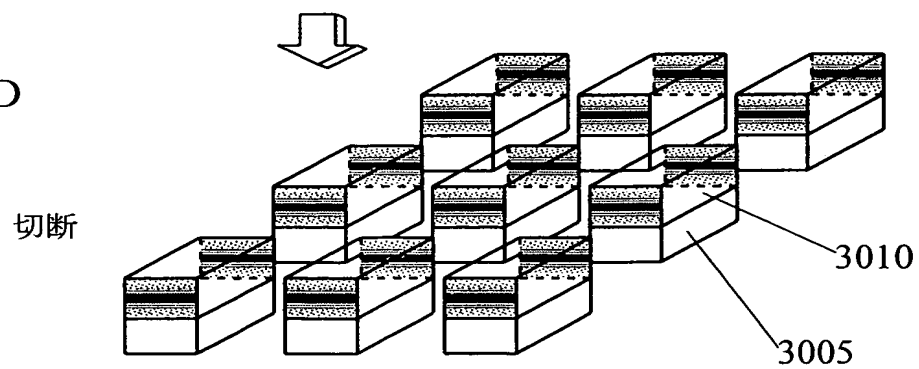


Fig.31A

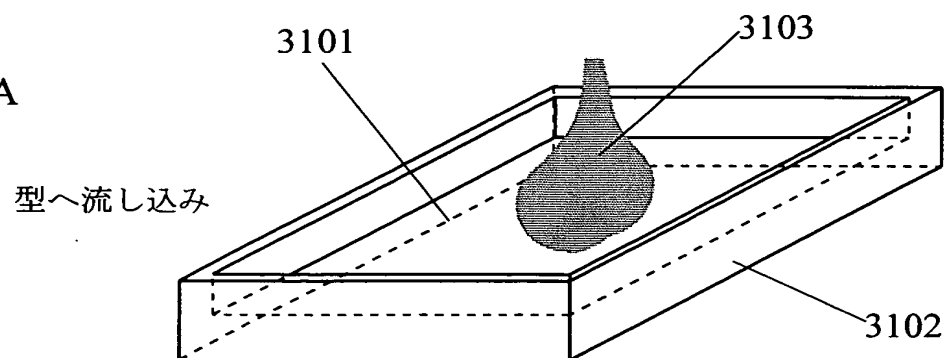


Fig.31B

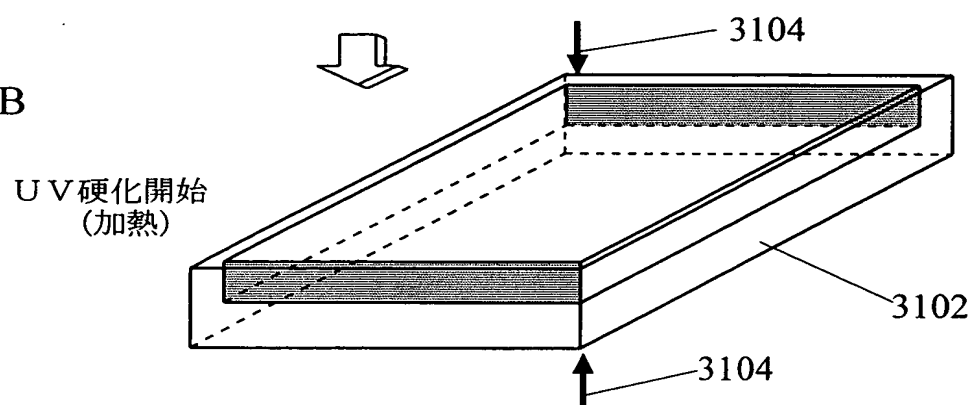


Fig.31C

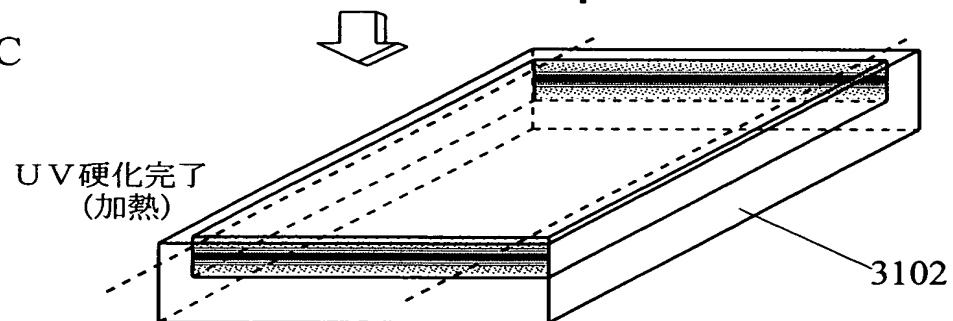


Fig.31D

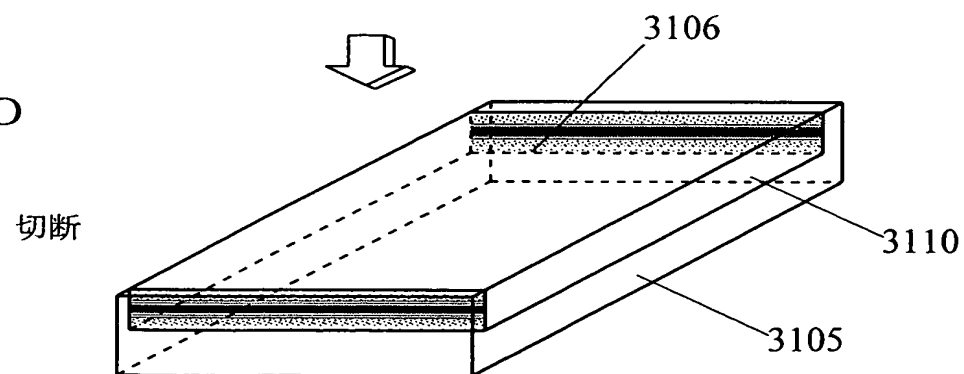


Fig.32A

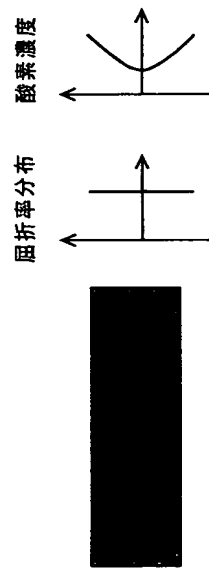


Fig.32B

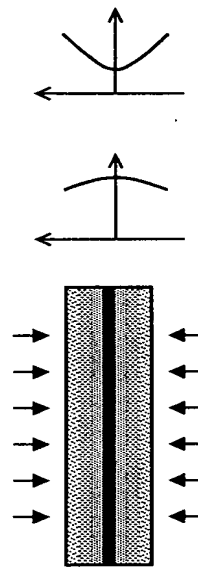


Fig.32C

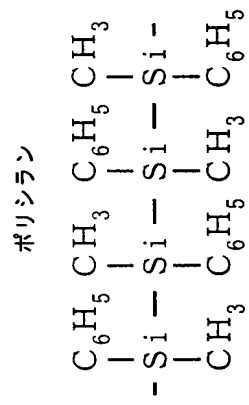
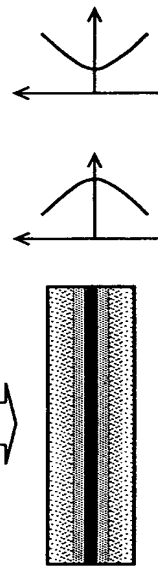


Fig.32D

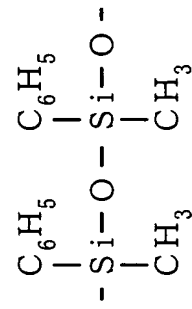
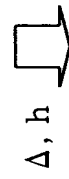


Fig.32E

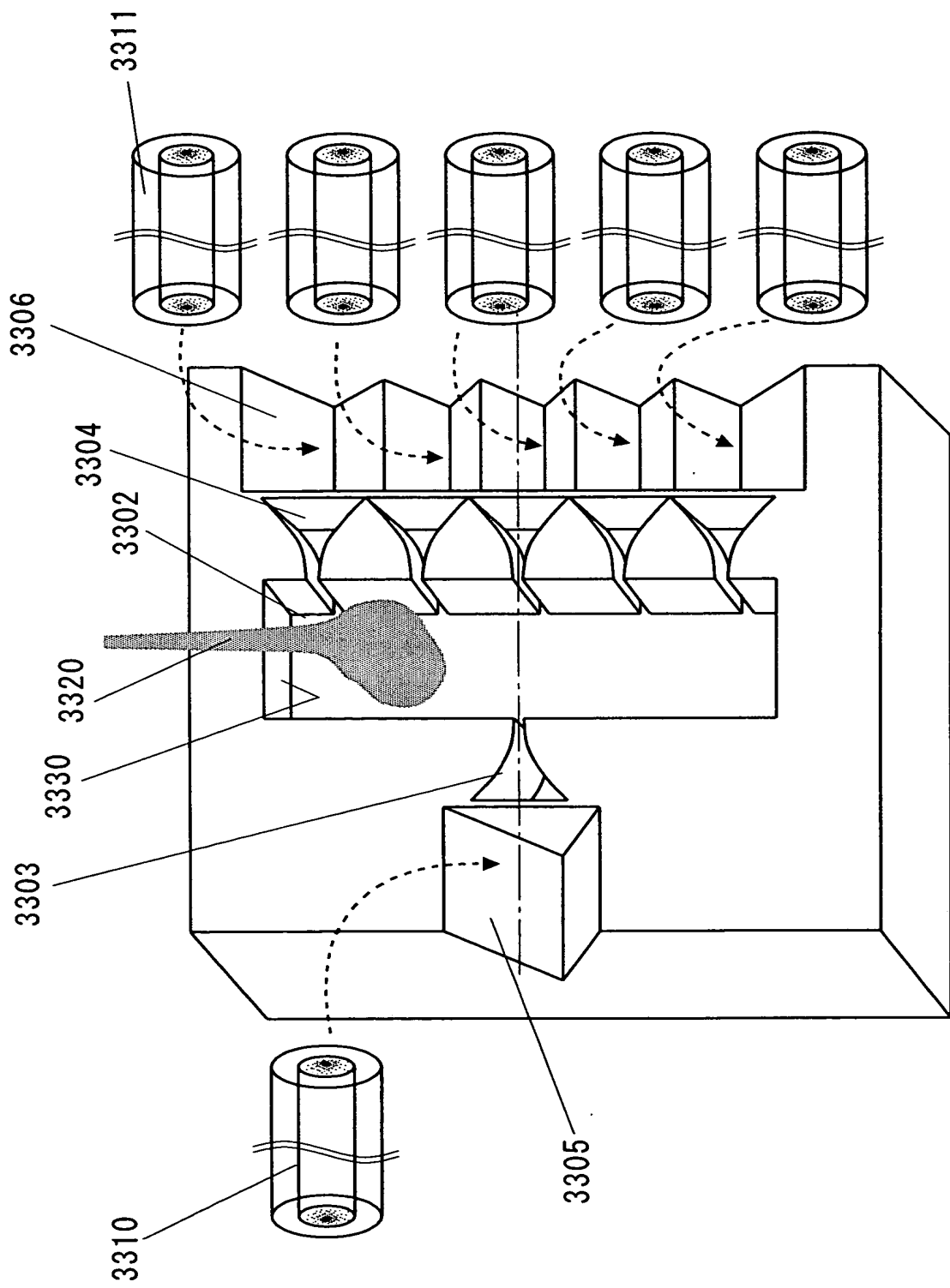


Fig.33

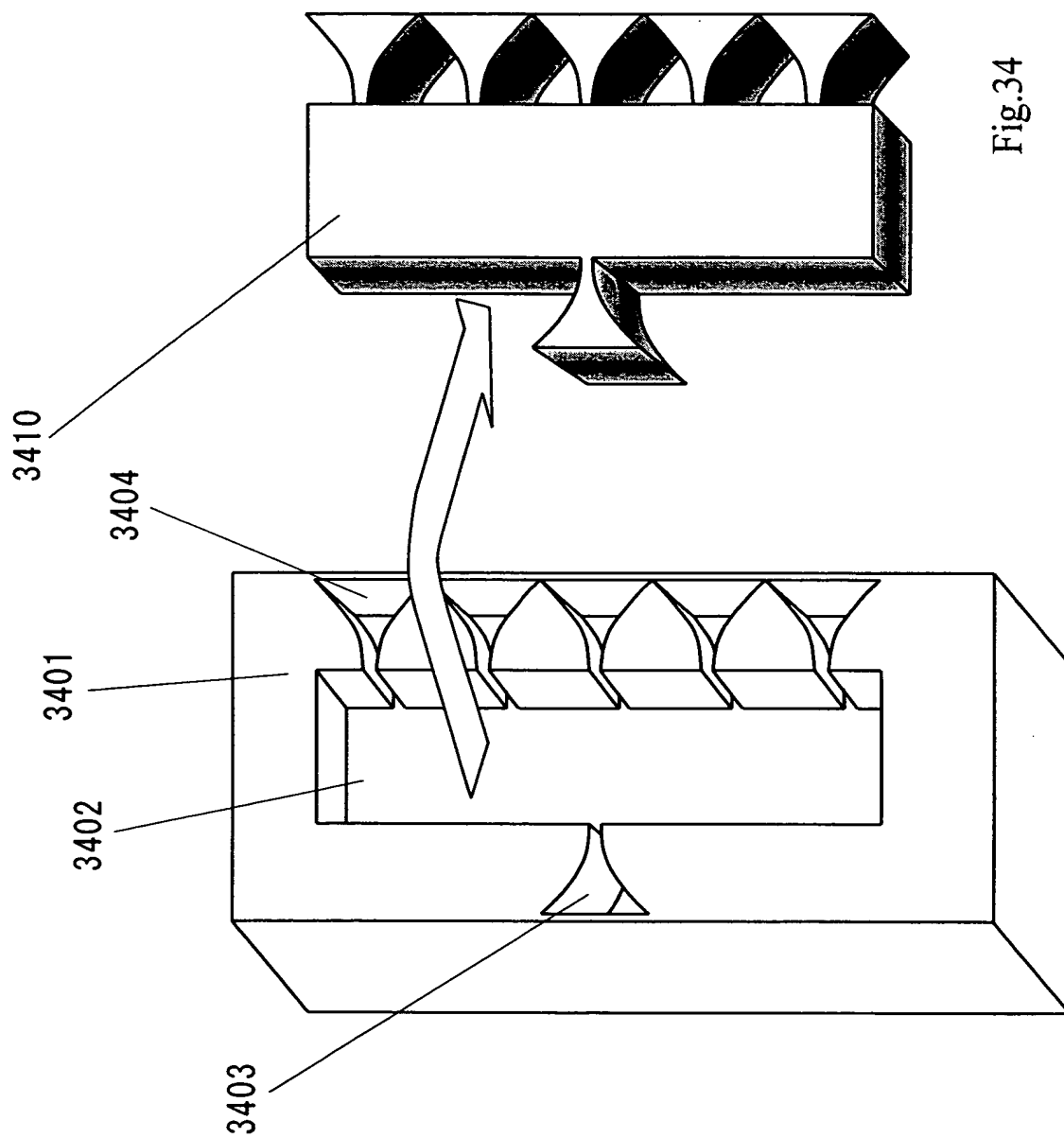


Fig.34

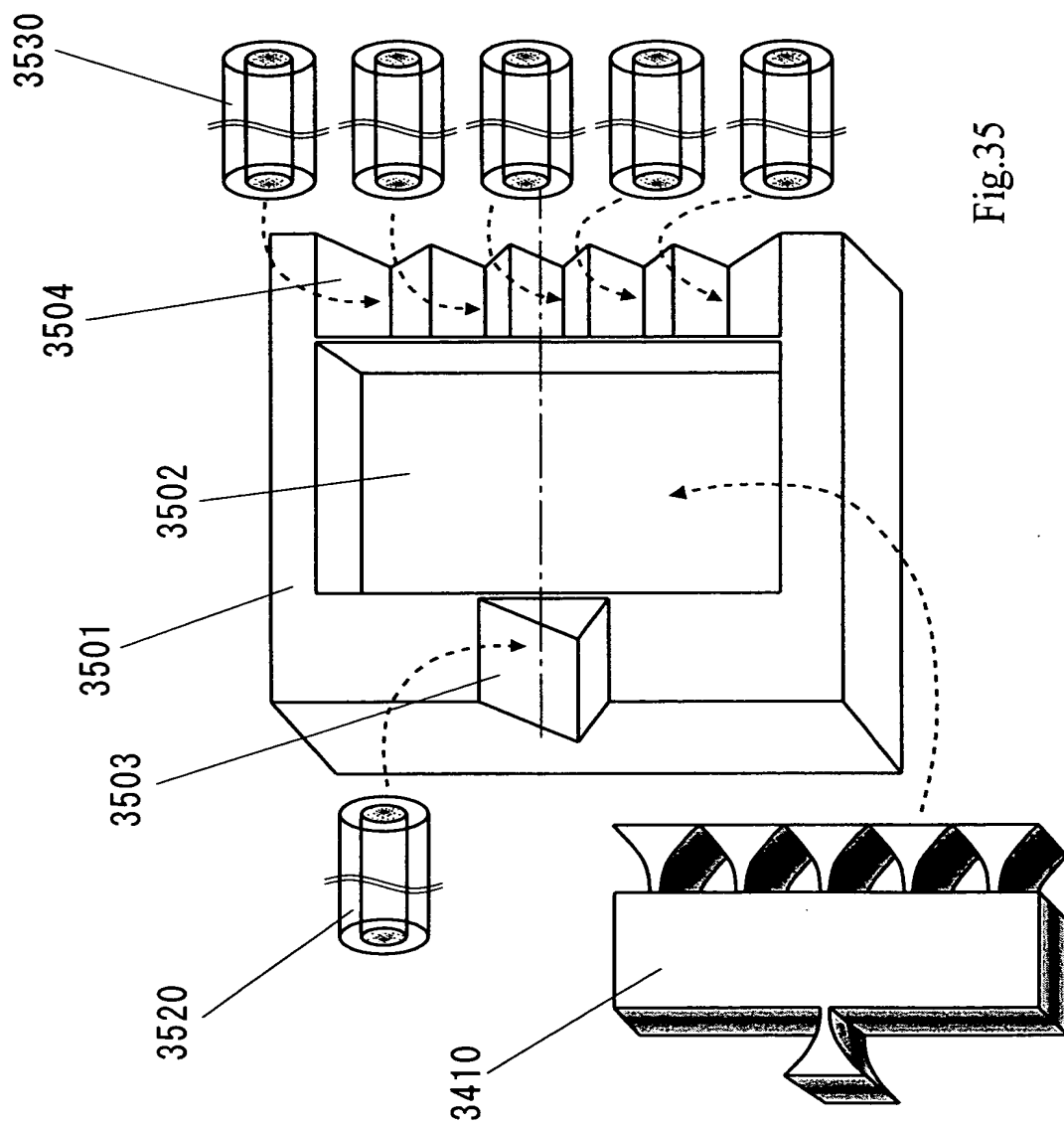


Fig.35

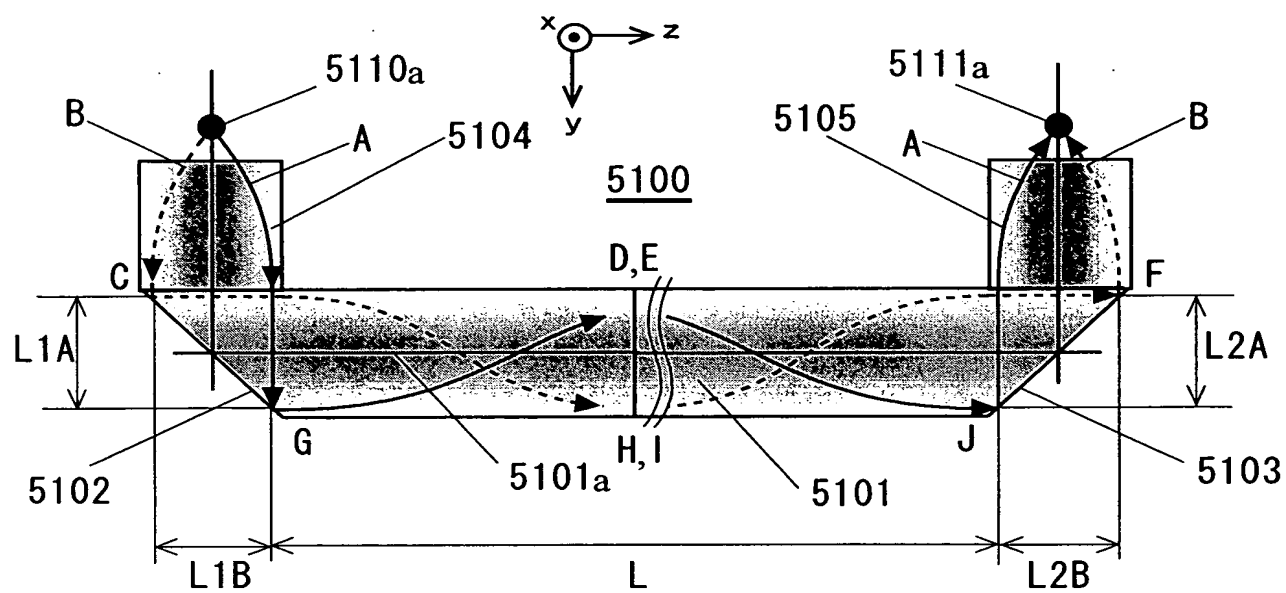


Fig.37

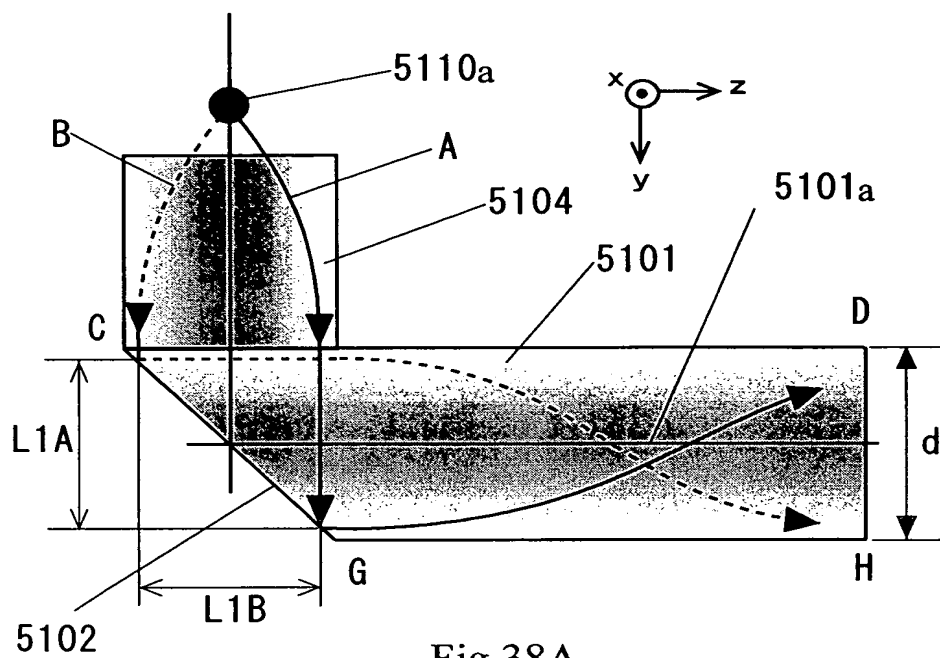


Fig.38A.

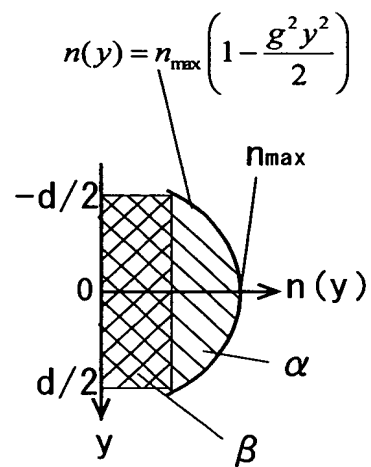


Fig.38B

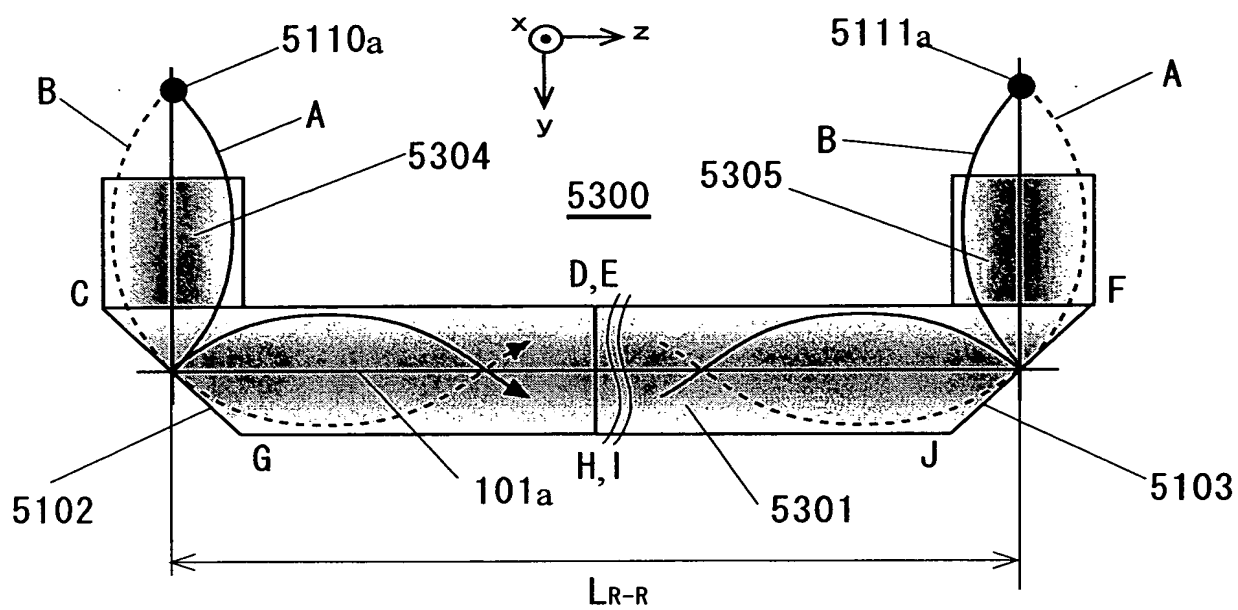


Fig.40

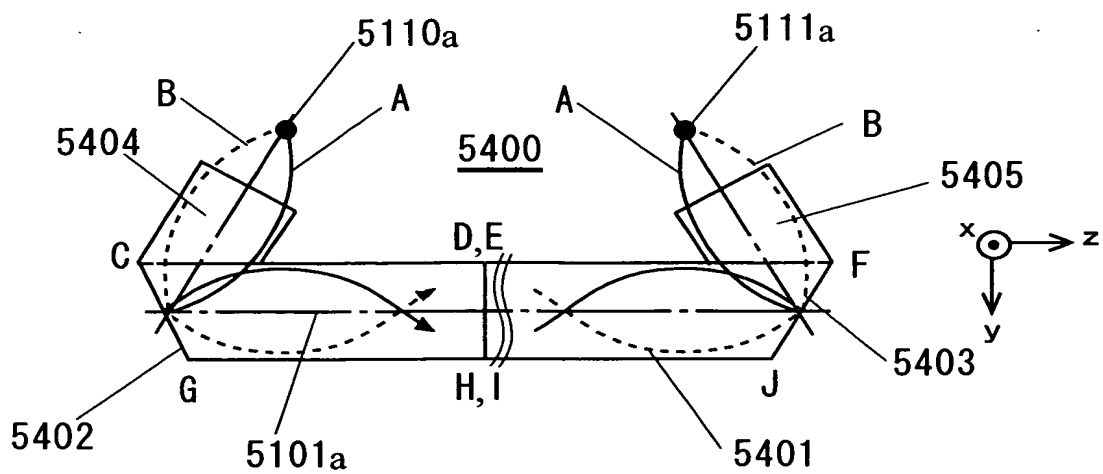


Fig. 41A

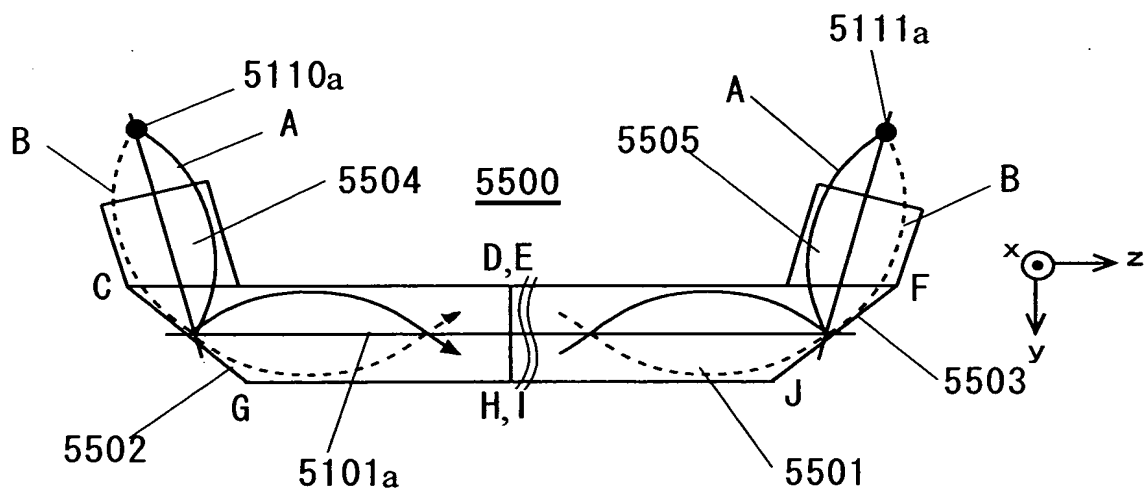


Fig. 41B

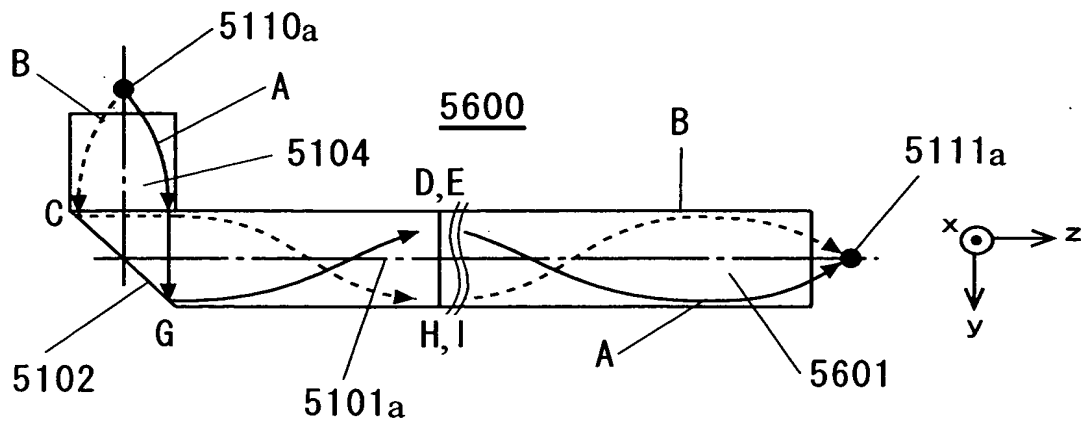


Fig. 42A

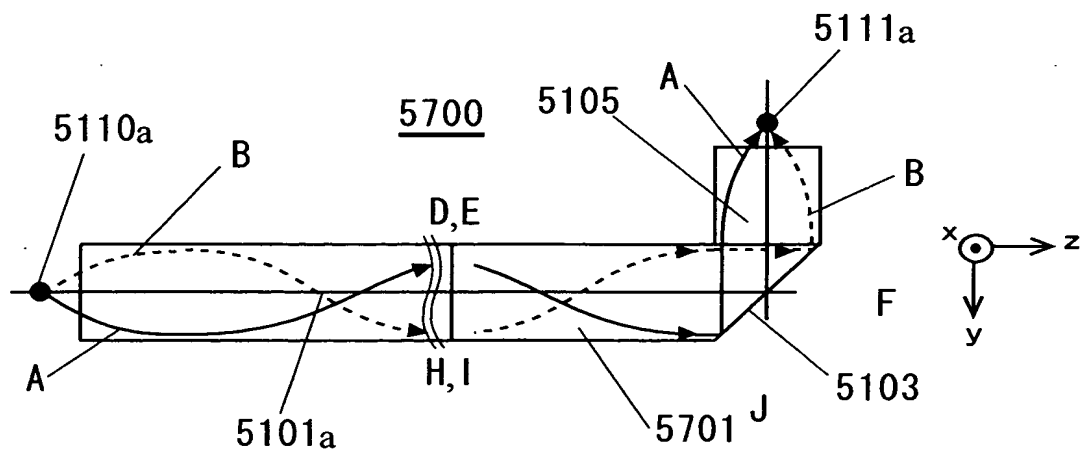


Fig. 42B

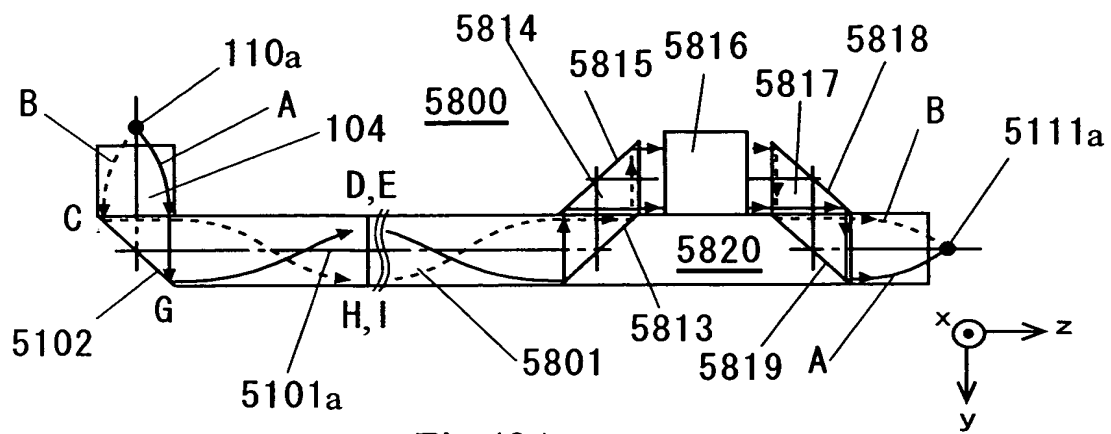


Fig.43A

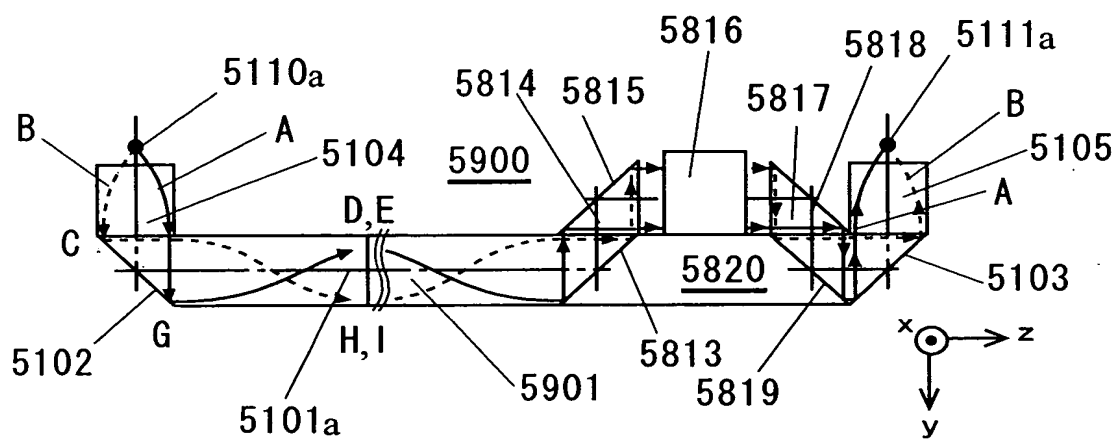


Fig.43B

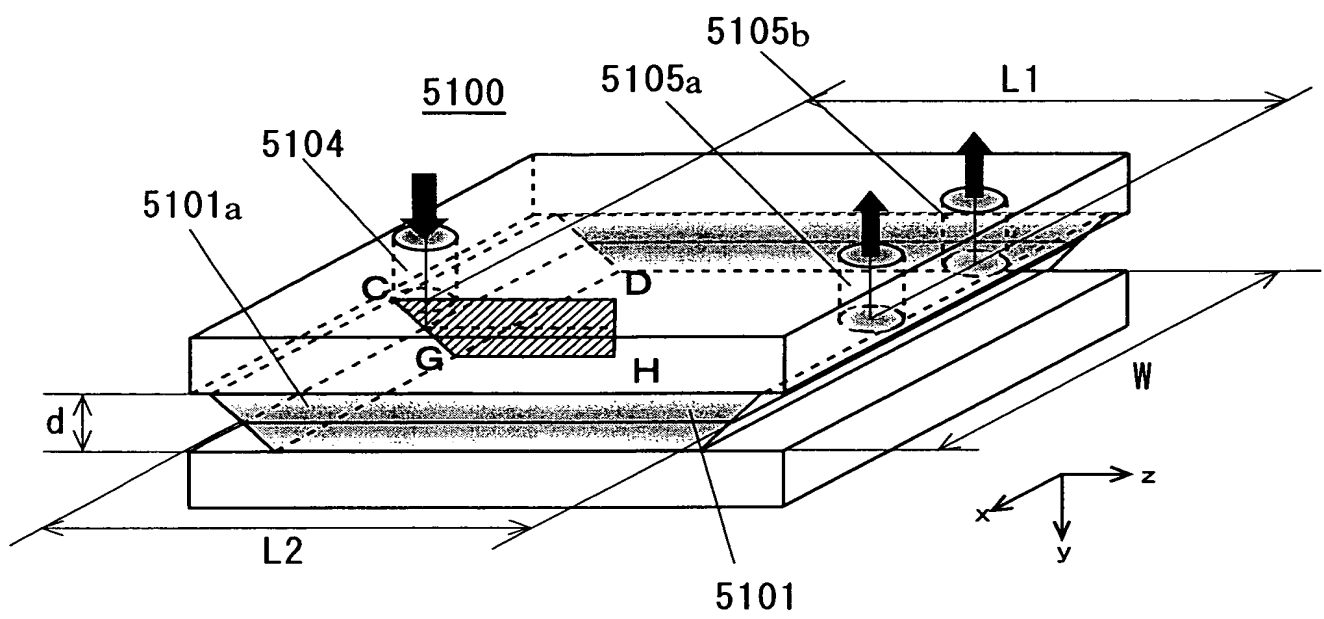


Fig.44

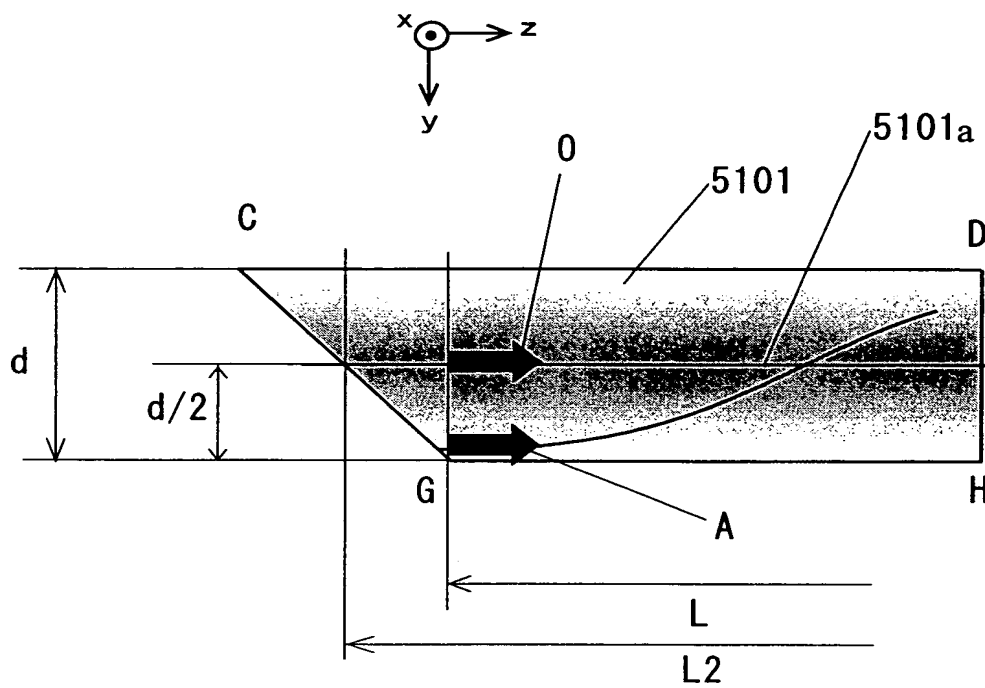


Fig.45

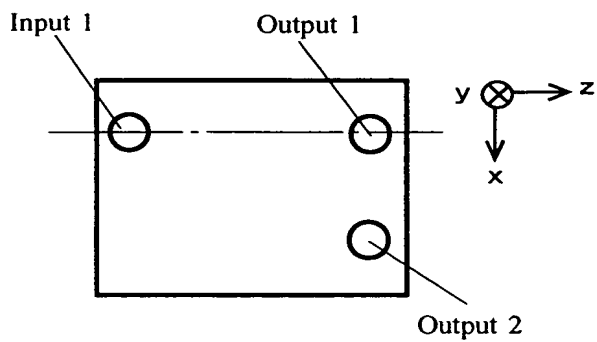


Fig.46A

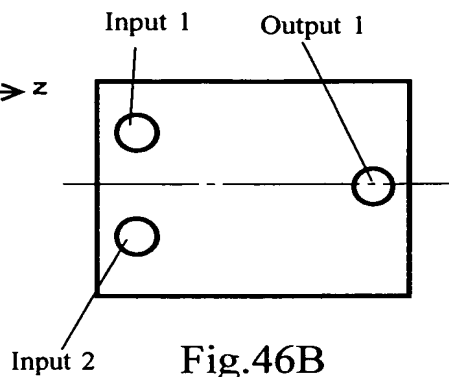


Fig.46B

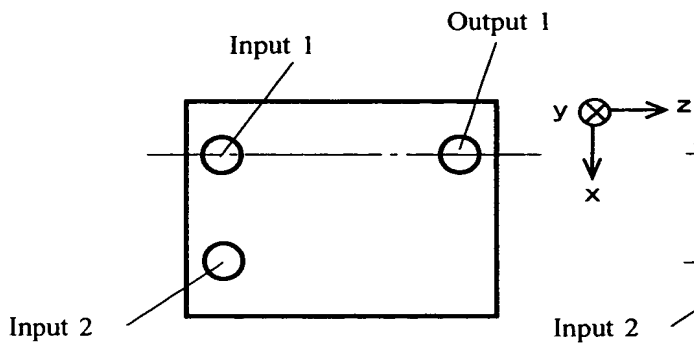


Fig.46C

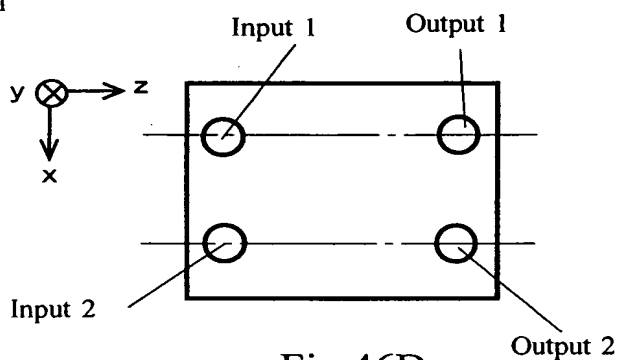


Fig.46D

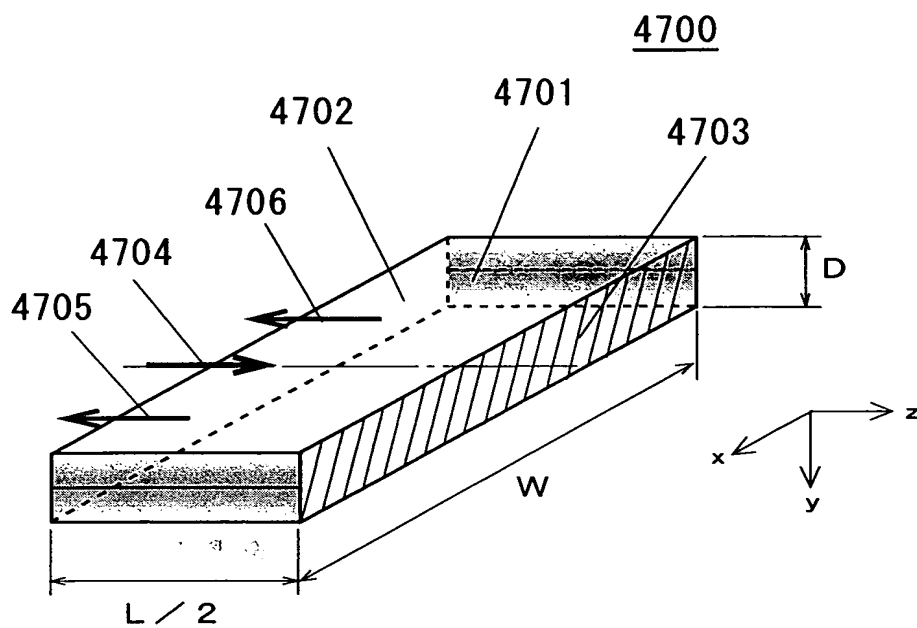


Fig. 47A

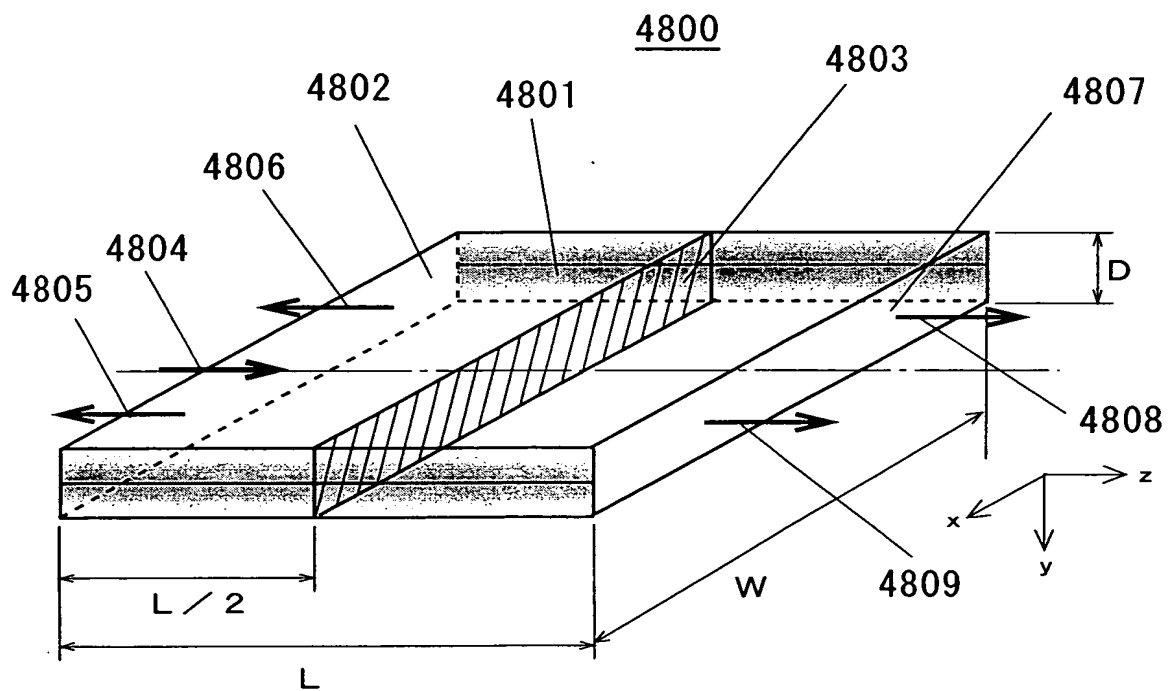


Fig. 47B